

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Problematika optimalizačních modelů
elektroenergetických sítí

Issues of Electricity Network Optimization Models

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 30. dubna 2018

.....
Ing. Tomáš Mozdřeň

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych rád chtěl poděkovat svému školiteli panu prof. Ing. Stanislavu Ruskovi, CSc. a dalším kolegům z katedry elektroenergetiky, kteří mi přispěli radou i pomocí při řešení úkolů spojených s disertační prací. V neposlední řadě děkuji svým rodičům za veškerou podporu během studia.

Abstrakt:

Disertační práce popisuje vznik a vývoj problematického modelu elektroenergetické sítě s obnovitelnými zdroji. Je zde vysvětlen vznik a vývoj platformy řešiče coby softwaru pro nalezení optimální topologie analyzované elektrizační soustavy. V jednotlivých kapitolách je vysvětlena funkce platformy řešiče. Dále je popsáno Technologické centrum, ve kterém jsou nainstalovány jednotlivé netradiční zdroje elektrické energie. Zobrazeny jsou i jednotlivé spotřebiče, které také ovlivňují chod Technologického centra. V neposlední řadě je provedena simulace pomocí softwaru EMTP – ATP na výkonovém reverzibilním měniči, která byla následně ověřena praktickým měřením a data byla zanesena do této práce.

Klíčová slova:

Technologické centrum, simulační software, model obnovitelných zdrojů, usměrňovač, střídač, střídavý zdroj.

Abstract:

The dissertation describes the emergence and development of the problematic electricity network model with renewable energy sources. There is explained the origin and development of the platform as software for finding solvers optimum topology of the analysis of the power system. The individual chapters explain the functions of the platform of the Solver. Further described technology centre, in which there are individual non-traditional sources of electricity. It shows the individual appliances that also affect how well the Technology Center. Last but not least is performed using the simulation software EMTP – ATP on the rating reversible converter, which was subsequently verified in a practical measurement and data have been introduced into this work.

Keywords:

Technology Center, Simulation Software, Renewable Sources Model, Rectifier, Inverter, AC Source.

Úvod	1
1 Cíle disertační práce	2
1.1 Rozpis řešení jednotlivých etap disertační práce.....	2
2 Řešení problému – vývoj simulace	4
3 Výběr vhodného softwaru	5
3.1 EMTP-ATP – program pro simulaci elektromechanických jevů	5
3.1.1 Programy pro spolupráci s ATP	8
3.1.2 Grafický preprocesor ATPDraw	8
3.2 EMTP-ATP na světové úrovni	10
4 Technologické centrum Ostrava	12
4.1 Popis a technologie v TCO	12
5 Zdroje elektrické energie TCO	14
5.1 Kogenerační jednotka	14
5.2 Stirlingův motor.....	15
5.3 Akumulátorovna	16
5.4 Fotovoltaické panely.....	18
5.5 Vodíková laboratoř	19
5.6 Diesela agregát	21
6 Spotřebiče elektrické energie TCO	22
6.1 Pyrolýzní jednotka	22
6.2 Dopravníky	23
7 Model technologického centra Ostrava	24
7.1 Model jednotlivých energetických zdrojů pomocí softwaru	24
7.1.1 Informace o namodelovaných zdrojích	25
7.2 Využití počítačového modelu k simulaci parametrů měniče.....	28
8 Charakteristika naměření	38
8.1 Sdružený analyzátor sítí BK – ELCOM provedení ENA500.12.....	38
8.1.1 Volba zapojení analyzátoru pro měření.....	39
8.1.2 Analýza naměřených dat v časové oblasti.....	40
8.2 Chyby měření a nejistoty měřicího přístroje	42
9 Analýza dat při nabíjení akumulátorů z DS	44
9.1 Popis průběhu měření	44
9.2 Simulace na počítačovém modelu	47

9.3	Chyby měřicího přístroje napětí	54
9.4	Chyby měřicího přístroje proudu	55
9.5	Zhodnocení simulace	55
10	Analýza dat při dodávce elektrické energie do DS	56
10.1	Popis průběhu měření	56
10.2	Simulace na počítačovém modelu	60
10.3	Chyby měřicího přístroje napětí	67
10.4	Chyby měřicího přístroje proudu	68
10.5	Zhodnocení simulace	69
11	Ověření nabíjecí charakteristiky olověného akumulátoru	70
12	Zobecnění výsledků disertační práce	74
13	Závěr	75
	Seznam použité literatury a podkladů	77
	Soupis publikací a řešených projektů	81
	Přílohy A – matematický popis analýzy nabíjení akumulátorů z DS	84
	Přílohy B – matematický popis analýzy dodávky elektrické energie do DS	86
	Přílohy C – matematický popis nabíjecí charakteristiky akumulátorů	89

Seznam použitých veličin a symbolů

C	(F)	kapacita
C_5	(A·h)	zaručená kapacita akumulčních baterií
$\cos \varphi$	(-)	účinník
E	(J)	energie
I_A, I_B, I_C	(V)	sdužené proudy jednotlivých fází na střídači
IN+	(V)	stejnosměrné napětí zdroje
J	(kg·m ²)	moment setrvačnosti
L	(H)	indukčnost
M	(N·m)	jmenovité zatížení stroje (moment)
OUT+, OUT-	(V)	stejnosměrné výstupní napětí
P	(W)	činný výkon
P_A, P_B, P_C	(W)	výkony jednotlivých fází na střídači
P_{AC_IN}	(W)	vstupní výkon DC/AC střídače
P_{AC_OUT}	(W)	výstupní výkon DC/AC střídače
P_{DC_IN}	(W)	vstupní výkon DC/DC měniče
P_{DC_OUT}	(W)	výstupní výkon DC/DC měniče
PWM period	(s)	perioda vzorkování PWM
R	(Ω)	odpor
THD	(%)	Total Harmonic Distortion
TRI period	(s)	perioda vzorkování pilového zdroje
U	(V)	napětí
U_A, U_B, U_C	(V)	sdužené napětí jednotlivých fází na střídači
u_B	(V)	chyba nejistoty typu B
U_{DC}	(V)	stejnosměrné napětí
U_{fm}	(V)	fázová maximální hodnota napětí
Δi	(A)	absolutní chyba proudu
ΔP_{AC}	(W)	výkonové ztráty na DC/AC střídači
ΔP_{DC}	(W)	výkonové ztráty na DC/DC měniči
Δu	(V)	absolutní chyba napětí

δx	(%)	relativní chyba
AC		střídavý proud
AC/DC		usměrňovač
DC		stejnosměrný proud
DS		distribuční soustava
DC/AC		střídač
DC/DC		stejnosměrný měnič
EMTP - ATP		název softwarové skupiny
GATE		Gate – řídicí elektroda tranzistoru
NGATE		Negative Gate – řídicí elektroda tranzistoru
G1, G2, G3		označení generátorů
H ₂		chemické značení vodíku
IT		označení izolované soustavy
k		koeficient rozdělení měřené veličiny
LiFePO ₄		druh akumulátorů (lithium-železo-fosfátový)
LPG		Liquified Petroleum Gas – topný plyn
LSB		Least Significant Bit – nejméně významný bit
M1		označení rezistoru
MINUS1		označení svorek komparátoru
PCU35		označení typu Stirlingového motoru
PEN		označení druhu vodiče v síti TN
PLUS1		označení svorek komparátoru
PWM		pulsně šířková modulace
RMS		Root Mean Square – efektivní hodnota
SM59_NC		označení stroje v ATPDraw
TACS		Transient Analysis Control Signal
TCO		Technologické Centrum Ostrava
TL1, TL2		označení tlumivky
TN-S		označení soustavy s uzemněným bodem
TRI		perioda pilového zdroje

TR1, TR2	označení transformátoru
U10, U20	označení výkonových měničů
U11, U21	označení výkonových měničů
UM_3	označení stroje v ATPDraw
UPS	zdroj nepřerušovaného napětí
VŠB – TUO	Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
vz.	počet vzorků

Úvod

Energetika je jedním z klíčových oborů ekonomiky každé země. Bezpečné a stabilní dodávání elektrické energie je cílem každé vlády a jedním z ostře sledovaných cílů zemí Evropské unie. Z tohoto důvodu lidstvo stále hledá cesty, jak omezit svou závislost na vyčerpatelných fosilních palivech. Alternativou k vyčerpatelným zdrojům jsou obnovitelné zdroje elektrické energie.

Výše uvedeného důvodu vznikl projekt pod názvem ENET (Energetické jednotky pro využití netradičních zdrojů energie), který od roku 2010 zkoumá vývoj technologických i energetických jednotek pro zpracování odpadů jako alternativních paliv, jejich přeměnu na tepelnou a elektrickou energii. Z tohoto důvodu vzniklo technologické centrum Ostrava (TCO), které bylo přizpůsobeno potřebám nevyužívané zástavby průmyslové oblasti městské části Vítkovic. TCO je jedním z odlehlých pracovišť VŠB-TU Ostrava, které bylo podpořeno z projektu ENET.

Cílem výzkumu je využití a praktické ověření akumulace elektrické energie pocházející buď z rozvodné sítě nebo z výrobních energetických jednotek instalovaných v TCO. Mezi hlavní části elektro energetického systému TCO lze označit kogenerační jednotku, velkokapacitní akumulátorový systém, fotovoltaický systém a akumulární energetický systém na bázi vodíkových technologií. Toto shrnutí je prvotním krokem analýzy energetického systému před započítáním tvorby dynamického modelu elektrické části TCO, který umožní zkoumat energetické bilance, analyzovat přechodové a zkratové jevy, které mohou na zdrojích samotných a na rozvodném systému TCO při jejich budoucím provozu nastat.

1 Cíle disertační práce

Hlavním cílem disertační práce je vytvořit dynamický model části TCO, který bude sloužit k analýze TCO a také pro sledování vybraných veličin v soustavě provozované při různých provozních podmínkách:

- Dodávka do elektrické sítě
- Provoz bez dodávky z elektrické sítě
- Akumulace elektrické energie ze sítě

Verifikace dynamického modelu dle „změřených“ stavů reálného centra určuje sledování ustálených stavů elektrizační soustavy a také lze pomocí nich sledovat i přechodné děje spojené s manipulační činností v síti, nebo taky jako odezvu na poruchové stavy. V uživatelském rozhraní je možné simulovat vybrané typy poruch, ať už symetrických či nesymetrických.

Dalším z cílů vývoje modelu pak bude porovnání vytvořeného modelu se skutečnými naměřenými údaji z laboratoří technologického centra. Tedy modelu, který bude umožňovat porovnání měření a simulace na elektrických zdrojích v TCO a stanovit závěr.

1.1 Rozpis řešení jednotlivých etap disertační práce

1. etapa – popis a technologie TCO

- Sestavení všech zdrojů elektrické energie do přehledného blokového schéma v rámci celého TCO
- Popis jednotlivých zdrojů, které se nachází v TCO

2. etapa – vytvoření modelu analyzované části centra

- Vytvoření počítačového modelu v simulačním programu EMTP - ATP
 - Simulace energetického přenosu na výkonovém měniči

3. etapa – experimentální měření v závislosti na stavu TCO

- Aplikace nasimulovaných dat
 - Měření energetického přenosu na výkonovém měniči při dodávce elektrické energie z distribuční sítě do olověných akumulátorů při jejich nabíjení
 - Měření energetického přenosu na výkonovém měniči při dodávce elektrické energie z olověných akumulátorů do distribuční sítě
- Vyhodnocení a porovnání simulace s naměřenými hodnotami

2 Řešení problému – vývoj simulace

Z důvodu předčasné predikce situací, kdy je potřeba zjistit, jak se bude dané zapojení chovat ještě před samotným měřením (vznik nečekaných událostí) je potřeba těmto nečekaným situacím předcházet. Jedna z možností, jak předcházet těmto situacím je vytvoření modelu části TCO, který bude odpovídat reálným hodnotám a zkoumat tak nežádoucí účinky a stavy.

V duchu této myšlenky je vytvořen model elektrické části v Technologickém centru. Model je vytvořen v softwaru, který se specializuje na přechodné děje a vypočítává je nebo porovnává na základě vložených informací. Tyto informace mohou být vypočtené, udané výrobcem, nebo z reálného měření. Na základě vložení reálných naměřených hodnot do modelu se může vypočítat, simulovat skutečný stav.

Vytvořený model může být využitý pro pracovníky z Technologického centra v Ostravě, tak i technickými pracovníky z jiných Technologických center, kteří se zabývají myšlenkou, nebo kteří se budou chtít zabývat danou situací a ověřit si naměřená data v praxi.

3 Výběr vhodného softwaru

Pro výše popsanou analýzu distribuční soustavy je potřeba vybrat vhodný softwarový prostředek. Existuje několik možností, které více, či méně splňují požadavky pro tuto analýzu:

- Možnost kvalitního modelu všech komponent – např. PWM zdroje
- Možnost externího zásahu do matematického modelu (časové změny proměnných)
- Výstupní informace o poměrech v síti = tabulka výsledků
- Dostatečná přesnost výpočtu
- Časově nenáročný výpočet
- Uživatelsky přívětivé prostředí

Pro výpočet a analýzu poměrů ve složitých elektrizačních soustavách je nutno použít také některou ze známých numerických výpočtových metod a algoritmů. Příkladem mohou být iterační metody jako Gauss-Seidlova iterační metoda, či dokonalejší Newton-Raphsonova a dále pak jejich modifikace.

3.1 EMTP-ATP – program pro simulaci elektromechanických jevů

Z dostupného výběru softwarů pro výpočty sítí, které jsou na katedře elektroenergetiky k dispozici (Matlab, Simulink, Modes, EMTP-ATP) bylo použito programu pro analýzu elektromechanických dějů elektrických systémů – ATPDraw.

Je to samostatný program z programové skupiny EMTP-ATP (Electro Magnetic Transients – Alternative Transients Program). Specialitou je možnost simulace přechodných dějů energetických systémů. Je uzpůsobený pro řešení obvodů popsaných pomocí algebraických, parciálních a diferenciálních rovnic. Pomocí tohoto programu lze řešit i rozsáhlé a komplikované elektrické sítě a také systémy řízení.

Původně navržený program byl použit ještě pro počítače pracující formou děrných štítků. Programovacím jazykem programu ATP je systém FORTRAN (zkratka FORmula a TRANslator - tedy překladač vzorců). Později vznikaly pro různé typy počítačů a použité

operační systémy hardwarově závislé překladače. Pro samotný výpočtový proces využívá zjednodušené modifikace Newton-Raphsonovy metody.

Rozsáhlé možnosti modelování a přidavné další prostředky umožňují modelování přechodných jevů. Diferenciální funkce v časové oblasti jsou následně řešeny pomocí lichoběžníkových pravidel integrace.[20], [32], [33]

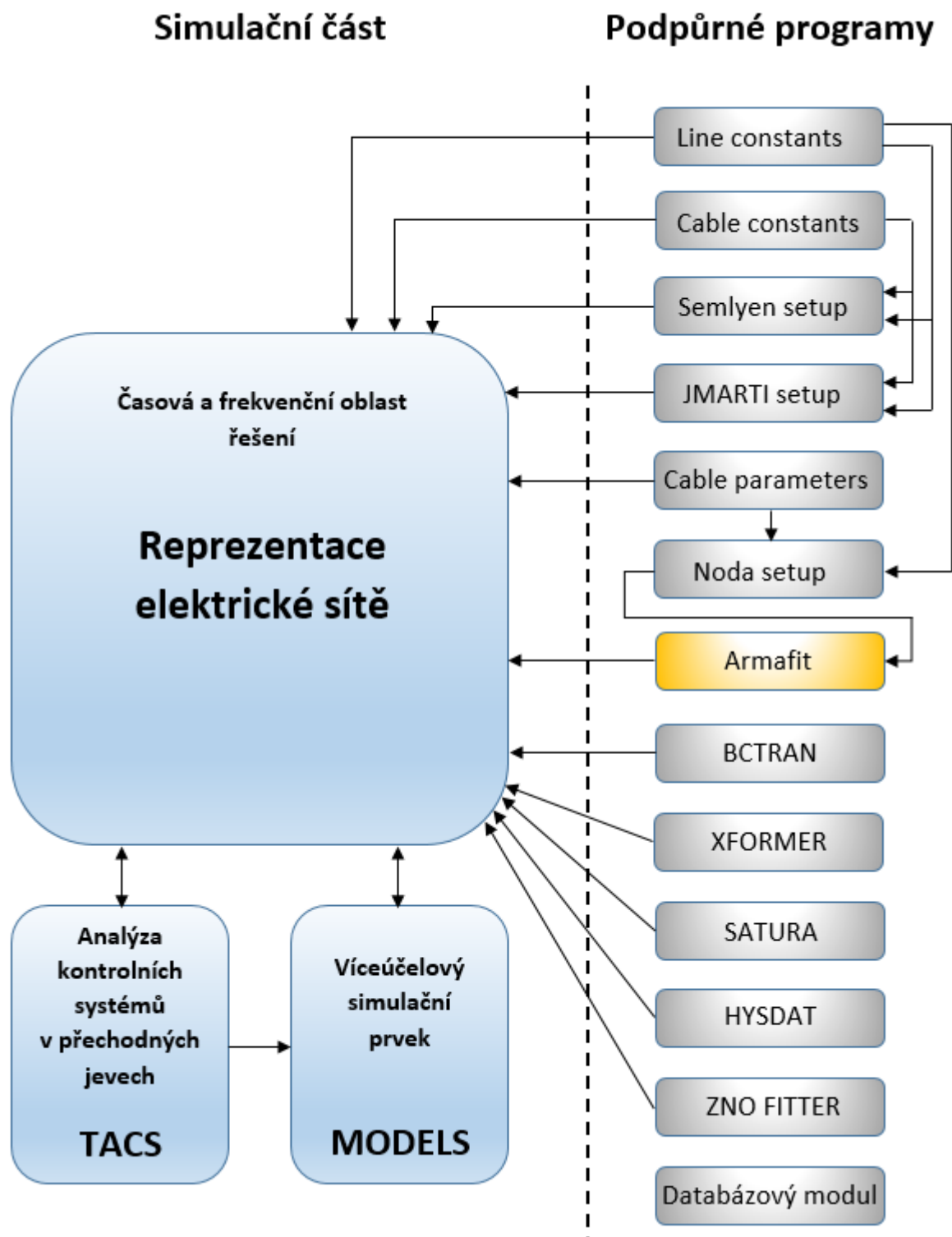
Maximální rozsah modelování elektrických sítí je:

- 250 uzlů
- 300 lineárních větví
- 40 vypínačů
- 50 zdrojů

Pro řešení algebraických, diferenciálních a parciálních rovnic program EMTP-ATP využívá obvody složené z těchto prvků:

- Prvky se soustředěnými parametry
- Prvky se vzájemnou vazbou
- Vícefázové přenosové vedení s prostorově soustředěnými i rozprostřenými parametry, které mohou být frekvenčně závislé
- Nelineární prvky R , L , C
- Spínače s proměnlivými spínacími podmínkami určené na simulaci diod, jiskřišť, tyristorů atp.
- Napěťové a proudové zdroje různých frekvencí.
- Model třífázového synchronního stroje s rotorem, budícím vinutím, tlumícím vinutím a pružným systémem na simulaci torzních oscilací.
- Modely univerzálního stroje na simulaci indukčního stroje, jednofázového střídavého stroje a stejnosměrných strojů.

Kromě aktuálních simulačních modulů existuje několik nesimulačních podpůrných programů, které mohou být použity pro generování datových modelů jako např.: výpočet parametrů vedení, nebo interpretace *RL* matic k prezentaci vícevinutových transformátorů. Schematický přehled dostupných podpůrných prostředků prezentuje Obr. 1



Obr. 1 Moduly programu EMTP – ATP [33]

TACS – je simulační modul na umožňující simulaci kontrolních systémů (signálů řízení) v časové oblasti. Presentace řídicích systému je provedena pomocí funkčních bloků. Spolupráce mezi elektrickou sítí a TACS je založená na výměně signálů mezi informací o uzlovém napětí, proudu vypínačů, časově proměnných odporech atp.

Původní použití systému TACS byl pro řízení vysokonapěťových stejnosměrných převodníků. Dnes je použití rozsáhlejší. Používá se na řízení budících systémů synchronních strojů, omezení proudu v bleskojistkách a pro jiné signály pro něž není konkrétní nabídka v knihovně ATP.

MODELS – patří, stejně jako TACS, mezi simulační moduly. Je to víceúčelový popisný jazyk používaný k vytváření vlastních objektů. [33]

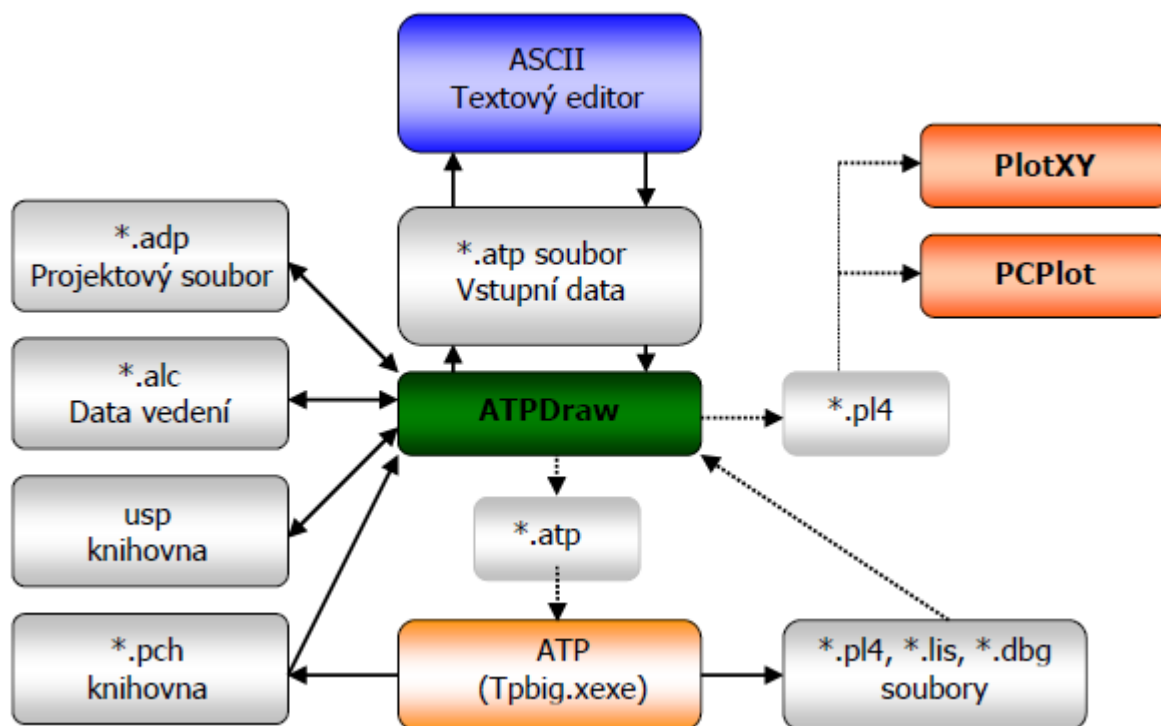
3.1.1 Programy pro spolupráci s ATP

Samotný program EMTP-ATP je pouze výpočtový. Kvůli větší přehlednosti, možností editace jednotlivých typů souborů a také pro vizualizaci simulací byl vytvořený ucelený soubor programů. Mezi tyto programy patří:

- ATPDraw – grafický procesor (uživatelské prostředí programu ATP)
- PlotXY, PCPlot – grafické procesory pro vizualizaci výstupních informací
- Programmer's File Editor (PFE) – textový editor pro vytváření a editaci vstupních souborů
- ATP Control Center – program soustřeďující všechny uvedené programy do jednoho okna

3.1.2 Grafický preprocesor ATPDraw

EMTP – ATP je simulační program, který obsahuje kromě výpočtového modulu jiné podpůrné programy (pre-procesory) a inicializační soubory. Ty umožňují např. spouštět externě simulace v ATP. [33]



Obr. 2 Schematický přehled funkce v rámci EMTP-ATP

Na Obr. 2 je znázorněno schéma popisující vnitřní strukturu funkce EMTP-ATP. Ukazuje vztah mezi grafickým procesorem ATPDraw v celém systému ATP. Plné čáry znamenají přenos dat, čárkované přenos informací. Výstupem nebo vstupem jsou soubory s příponou *.adp určené pro archivaci zvoleného schématu. Dále soubor s příponou *.atp určené pro výpočtové jádro ATP se spouštěcím programem TpbigW.exe. Další výstupy *.pch, *.lib, *.alc, ve kterých je možné definovat vlastnosti vícenásobně použitých obvodových elementů (vedení, transformátory, atd.). [33]

Průběh výpočtu je možné nechat zobrazit na obrazovce či jej potlačit jako aplikaci na pozadí. Během výpočtu se vytvářejí a ukládají tři druhy souborů:

- *.pl4 – určený pro grafickou interpretaci zájmových veličin (nutné zobrazení v Plot programech)
- *.dbg – upozornění uživatele na chyby výpočtu
- *.lis – textový soubor obsahující všechny zájmové proměnné v tabulkově textové formě.

3.2 EMTP-ATP na světové úrovni

Jak už bylo zmíněno v předchozí kapitole, tak program EMTP – ATP je univerzální programový systém pro počítačovou simulaci přechodných jevů elektromagnetické i elektromechanické povahy. S tímto počítačovým programem lze simulovat komplexní sítě a řídicí systémy libovolné struktury. Proto je tento program oblíbený díky svým parametrům, kterým disponuje už více než 20 let, kde je stále nepřetržitě rozvíjena prostřednictvím mezinárodních příspěvků.

Proto v roce 1994 vznikla skupina EEUG (European EMTP-ATP Users Group e.V) jako sdružení zaregistrované u místního soudu Offenbach am Main, Německo. Účelem organizace EEUG, kterou daňový úřad považuje za veřejně prospěšnou organizaci, je organizovat kurzy, schůzky, zveřejňovat informační bulletin, působit jako komunikační centrum pro uživatele ATP-EMTP a koordinovat distribuci programu. Vedle technických dokumentů jsou do tohoto bulletinu zahrnuty rubriky jako čtenářský koutek, informace o programu, lidé a profily, tipy a triky. [32]



Obr. 3 Světová mapa skupiny EEUG [32]

Program ATP je v současnosti udržován a rozvíjen mezinárodními subjekty po celém světě. Tyto subjekty jsou znázorněny na Obr. 3.

- Canadian/American EMTP User Group
- European EMTP-ATP Users Group Assoc. (EEUG)
- Japanese ATP User Group (JAUG)
- Latin American EMTP User Group (CLAUE)
- Argentinian EMTP User Group (CAUE)
- Brazilian EMTP User Group (CBUE)
- Australian EMTP User Group (AEUG)
- Korean EMTP User Group
- Republic of China EMTP User Group
- Indian EMTP User Group
- South African ATP User Group

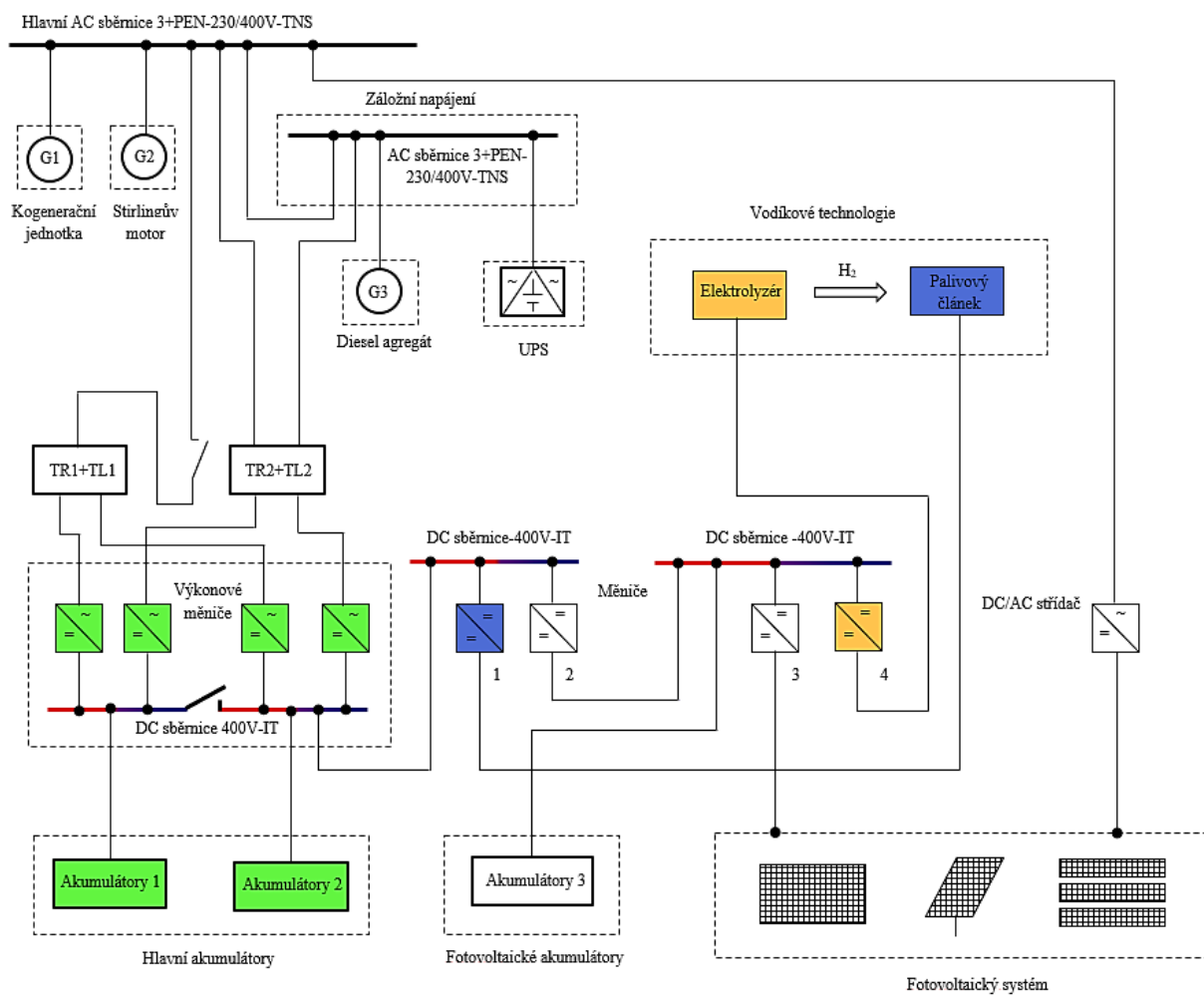
Díky těmto subjektům rozmístěných po celém světě vznikají po celém světě kvalitní příspěvky na téma EMTP – ATP, které pomáhají dalším lidem, jak na univerzitní půdě, tak v soukromé profesi využívat program k simulaci a dalšímu zkoumání v elektroenergetice.

Jak již bylo zmíněno v úvodní řeči, tak vytvořený model je jako jediný svého druhu v takovém zapojení daných prvků, které jsou zapojené a určeny pro danou simulaci v TCO. Na světové úrovni existuje celá řada publikací, které odkazují na vytvořené fotovoltaických panelů, vodíkových článků, nabíjení akumulátorů, dále zapojení měničů, střídačů, nebo jiných prvků z knihovny ATP. Ale za celou dobu svého studia, jsem se nesetkal s vytvořeným modelem, který má sloužit pracovníkům TCO, nebo jiným pracovníkům z jiných center, kteří se chtějí danou myšlenkou výzkumu zabývat.

4 Technologické centrum Ostrava

4.1 Popis a technologie v TCO

Zjednodušené elektrické schéma technologického centra v Ostravě je zobrazeno na Obr. 4. Jednotlivé zdroje energie jsou pro lepší přehlednost rozděleny a zakresleny do technologických bloků, které je sdružují dle jejich základních funkčních principů nebo předpokládané návaznosti na ostatní technologie v TCO. Primární napájení TCO a rovněž vyvedení výkonu centra je zajištěno prostřednictvím připojení na lokální distribuční soustavu. Páteřním zdrojem elektrického výkonu TCO je kogenerační jednotka s asynchronním generátorem s výkonem 100 kW spolupracující s plynovým pístovým spalovacím motorem. Do této jednotky je přiváděno plynné palivo z procesní pyrolytické jednotky kontinuálně zásobované typicky v objemu 250-450 kg palivového materiálu za hodinu (v závislosti na jeho složení). Topologie rozvodné soustavy elektrické energie TCO je tvořena hlavní AC sběrnici s možností připojení na AC záložní sběrnici. Celý rozvodný systém centra je navrhnut a realizován jako plně soběstačný s eventuální možností přejít do provozu v ostrovním systému 3x230/400 V, a v případě potřeby s možností napájení přilehlých průmyslových budov. Důležitou součástí celého TCO je vybavení různými akumulacími systémy. Tato akumulace je zajištěna různými typy akumulátorů, které jsou propojeny s hlavní stejnosměrnou sběrnici DC 400 V. Tato sběrnice umožňuje rozvádět elektrický výkon do jednotlivých částí zařízení a systému prostřednictvím měničů. Propojení mezi stejnosměrnými sběrnici a sběrnici se standardními síťovými parametry je zajištěno výkonovými polovodičovými střídači, které spolu s vazebními transformátory a tlumivkami TR1 + TL1 a TR2 + TL2 umožňují obousměrný přenos energie mezi sběrnici. Pokud je centrum odpojeno od dodávky ze sítě a jsou vyčerpány jeho vlastní akumulací kapacita a výrobní zdroje, je v záloze dieselaagregát, který má zajistit stálou dodávku energie a bezpečné odstavení všech technologií, zejména pyrolýzní jednotky. [1], [3]



Obr. 4 Připojení reálných elektrických zdrojů TCO do jednotlivých bloků [1], [23]

5 Zdroje elektrické energie TCO

Mezi hlavní zdroje elektrické energie, které jsou využívány v laboratořích technologického centra Ostrava, patří:

- Kogenerační jednotka
- Stirlingův motor
- Akumulátory
- Fotovoltaické panely
- Vodíkové technologie
- Dieselagregát
- Jednotka UPS

5.1 Kogenerační jednotka

Kogenerace je společná výroba elektřiny a tepla. Je tak dosaženo většího využití energie při spalování paliva, nebo jiných dostupných primárních zdrojů v energetice či dopravě. Při použití motoru vzniká velké množství odpadního tepla, které tvoří tepelné ztráty procesu výroby a přeměny energie.

Při kogeneraci, která je použita v TCO se odpadní teplo výhodně využívá k ohřevu teplé užitkové vody TUV, vytápění či k podobným účelům.



Obr. 5 Kogenerační jednotka [24], [27]

Tabulka 1 Parametry generátoru kogenerační jednotky[1], [3], [27], [36]

Synchronní generátor			
Stupeň krytí	IP23	Jmenovité napětí	400 V
Frekvence	50 Hz	Počet fází	3
Otáčky	1500 ot·min ⁻¹	Zapojení vinutí	D
Plánovaná zátěž	23,9 V/2,97 A	Zdánlivý výkon	125 kV·A
Proud naprázdno	0,83 A	Činný výkon	100 kW
Třída izolace	H/H	40φC	180 A

V technologickém centru je použita kogenerační jednotka s činným výkonem 100kW, která je napájena pyrolýzní jednotkou spalující pyrolýzní plyn. Výkon kogenerační jednotky závisí na vstupním materiálu, který se testuje v pyrolýzní jednotce. Kogenerační jednotka je postavena na bázi spalovacího motoru, který je spojen se synchronním generátorem.

5.2 Stirlingův motor

Stirlingův motor, který je instalován, jako netradiční zdroj energie je horkovzdušný nebo také teplo-plynný motor, který pracuje s vnějším zdrojem tepla. To znamená, že zdroj tepla je mimo jeho pracovní válec. Tímto vnějším zdrojem mohou být různé primární zdroje, jako jsou například uhlí, ropná frakce, biomasa, solární energie, apod.

Stirlingův motor, který je nainstalován v technologickém centru je typu PCU35 solar/gas s výstupním elektrickým výkonem 10 kW a tepelným výkonem 25 kW. Motor spaluje jako kogenerační jednotka směs pyrolýzního a zemního plynu nebo pouze čistý zemní plyn. Stirlingův motoru je konstruován tak, že je roztáčen ze sítě svým asynchronním strojem.

Jednotka Stirlingova motoru se chová během svého rozběhu jako spotřebič a po zahřátí na provozní teplotu a jejím nafázování na síť přejde plynule do generátorického režimu.



Obr. 6 Stirlingův motor

Tabulka 2 Parametry Stirlingova motoru [1], [3], [27]

Stirlingův motor		Asynchronní motor	
Typ	PCU35-GAS	Počet fází	3
Stupeň krytí	IP45	Činný výkon	11 kW
Frekvence	50Hz	Účinník $\cos \varphi$	0,85
Jmenovité napětí	230/400 V	Jmenovité napětí	Y 690 V D 400 V
Plyn	Bio, LPG, Zemní plyn, Pyrolýzní plyn	Jmenovitý proud	Y 12,1 A D 21 A
Electrický/ topný výkon	2-10 kW /9-25 kW	Otáčky	1470 ot·min ⁻¹

5.3 Akumulátorovna

Na základě požadavků na provoz centra byla navržena akumulace do baterií, které umožňují připojení přes výkonové reverzibilní měniče ke střídavé síti 3 x 400 V. Celková vysoká hmotnost a rozměry akumulátorovny jsou jedním z hlavních důvodů, proč byla instalována v přízemí technologického centra. Celá akumulátorovna je znázorněna na Obr. 7. Akumulátorovna je pomyslně rozdělena na dvě části (sekce). Jsou v ní instalovány dvě funkčně

oddělené akumulátorové banky. Obě akumulátorové banky dodávají elektrickou energii na hladině napětí 400 V.

První část je tvořena pěti bloky akumulátorů na každé straně místnosti akumulátorovny. V jednom bloku je 40 olověných článků, které jsou zapojeny do série. Napětí jednoho bloku je 80V s kapacitou 930 A·h. Tyto akumulátory zabezpečují hlavní akumulaci kapacitu centra a zároveň udávají základní referenční hladinu napětí stejnosměrných sběrnic v TCO, které jsou pak propojeny prostřednictvím měničů.

Druhá část je tvořena 100 kusy LiFePO₄ akumulátorů zapojených do série na každé straně s celkovou kapacitou 100 A·h. Tyto akumulátory slouží k akumulaci přebytečného výkonu z fotovoltaických panelů a slouží jako energetické „buffery“ pro elektrolýzu ke krytí výkonových výkyvů v napájení jednotek elektrolýzérů. Nevýhodou akumulátorovny je nízká účinnost cyklu nabíjení. [27]



Obr. 7 Akumulátorovna

Tabulka 3 Parametry hlavních a fotovoltaických baterií [1], [23]

Hlavní akumulátorové baterie			
Jmenovité napětí bloku		80 V	
Kapacita jednoho bloku		C ₅ 930 A·h	
Minimální napětí článku	1,65 V	Minimální napětí bloku	66 V
Jmenovité napětí článku	2,05 V	Jmenovité napětí bloku	82 V
Maximální napětí článku	2,44 V	Maximální napětí bloku	98 V
Jmenovitá kapacitní energie W = 381,3 kWh			

Baterie fotovoltaických článků			
Celková kapacita		C 100 A·h	
Minimální napětí článku	2,8 V	Minimální napětí bloku	280 V
Jmenovité napětí článku	3,6 V	Jmenovité napětí bloku	360 V
Maximální napětí článku	4,0 V	Maximální napětí bloku	400 V
Jmenovitá kapacitní energie W = 36 kWh			

5.4 Fotonvoltaické panely

Fotonvoltaický systém je instalován na střechách technologického centra, a je tvořen třemi sekcemi, každá sekce je sestavena z jiných druhů panelů.

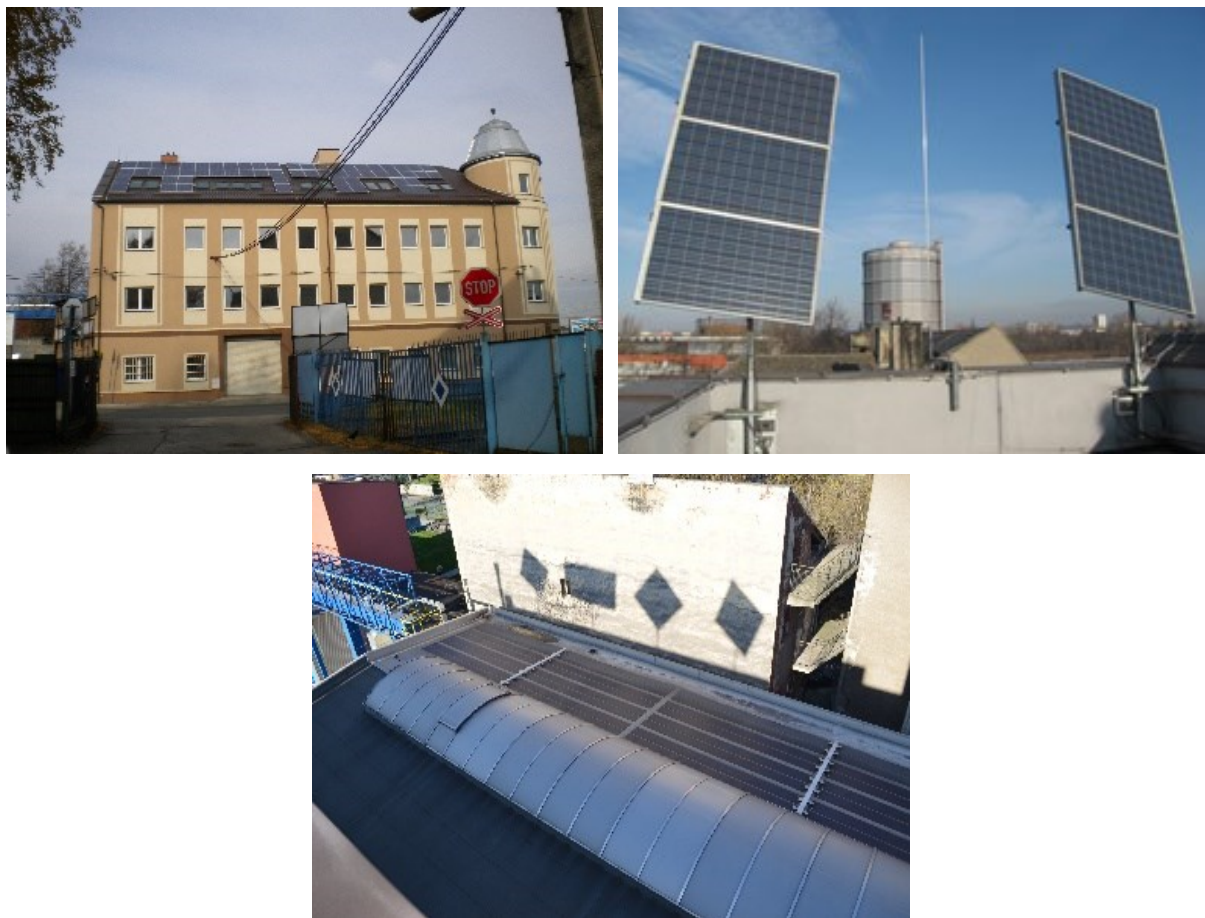
Prvním použitým typem, jsou polykrystalické fotonvoltaické panely, které jsou umístěny staticky na šikmé střeše centra. Tato sekce je tvořena 60 panely s nominálním výkonem jednoho panelu 210 W.

Druhým použitým typem jsou, polohovací polykrystalické fotonvoltaické panely tzv. „trackery“, které využívají nejvhodnější nasměrování ke slunci. Tato sekce je tvořena 18 panely s nominálním výkonem jednoho panelu 230 W.

Třetím typem jsou amorfní fotonvoltaické pásy, které jsou umístěné na vodorovné střeše technologického centra. Třetí sekce je tvořena 10 panely a nominálním výkonem jednoho panelu 576 W.

Elektrická energie, která je vyrobena z jednotlivých panelů je svedena do akumulátorů, kde se využívá jako „buffery“ elektrolýzy nebo je uskladněna. Celkový instalovaný výkon

fotovoltaických panelů je 22,5 kW. Nevýhodou těchto zdrojů je jejich proměnlivý výkon v závislosti na počasí. Také mají malý zkratový výkon. [1], [23], [27]



Obr. 8 Jednotlivé typy fotovoltaických panelů

5.5 Vodíková laboratoř

Vodíkové technologie využívají akumulaci energie založenou na principu uzavřeného okruhu využití plynného vodíku. Vodíkové technologie zabezpečují v TCO přeměnu elektrické energie na plynný vodík a tedy přeměnu elektrické energie na energii chemickou prostřednictvím elektrolýzy vody jednotkách elektrolyzérů s polymerními membránami. Plynný vodík se posléze ukládá do tlakových zásobníků a v případě potřeby je využit pro zpětnou výrobu elektrické energie.

Výroba elektrické energie z vodíku probíhá v laboratoři vodíkových technologií na nízkoteplotních palivových článcích s polymerní membránou. Systém akumulace vodíku je

navržen pro provoz čtyř jednotek elektrolyzéru s kapacitou produkce vodíku jedné jednotky cca $1 \text{ N}\cdot\text{m}^3/\text{hod}$ plynného vodíku. Pět modulů palivových článků generuje výkon až 50 kW. [1], [27]



Obr. 9 Laboratoř vodíkových technologií

Vodíkový systém je navržen pro plánovaný provoz v režimu výroby elektrické energie dvakrát 4 hodiny týdně a pro provoz v režimu elektrolyzy, to za předpokladu, když svítí slunce na fotovoltaické panely. Pro zajištění správné funkce vodíkové technologie, palivového článku, elektrolyzy a jiných provozních funkcí musely být navrženy rozvody plynu, velké skladovací prostory pro vodík, kontroly a měření, rozvody chladiv a elektrolytů a v neposlední řadě i bezpečnostní klimatizace laboratoře. Pro potřeby tvorby příslušných funkčních modelů bude zapotřebí brát v úvahu základní provozní vlastnosti palivových článků resp. jednotek elektrolyzérů na bázi polymerních membrán a to, že se jeví jako velmi napětově měkké zdroje resp. spotřebiče, které zároveň vykazují relativně velkou vstupní impedanci kapacitního charakteru.

5.6 Dieselagregát

Pokud je centrum odpojeno od dodávky ze sítě a jsou vyčerpány jeho vlastní akumulární kapacity včetně dalších 3 zdrojů, je v záloze dieselagregát, který má zajistit stálou dodávku energie a bezpečné odstavení všech technologií, zejména pyrolýzní jednotky. [1], [27]



Obr. 10 Dieselagregát

Tabulka 4 Parametry synchronního generátoru dieselagregátu [1], [27]

Synchronní generátor			
Stupeň krytí	IP21	Jmenovité napětí	400 V
Frekvence	50 Hz	Počet fází	3
Otáčky	1500 ot·min ⁻¹	Zapojení vinutí	S
Plánovaná zátěž	31,6 V/2,1 A	Zdánlivý výkon	125 kV·A
Jmenovitý proud	152 A	Činný výkon	84 kW
Třída izolace	H	Účinník cos φ	0,8 A

6 Spotřebiče elektrické energie TCO

Mezi hlavní spotřebiče elektrické energie, které jsou zapojeny v laboratořích technologického centra Ostrava, patří:

Tabulka 5 Hodnoty příkonů jednotlivých spotřebičů v TCO

Spotřebiče TCO	
Dopravníky - logistika	120 kW
Pohony - obslužné technologie	54 kW
Pyrolýzní jednotka	33 kW
Pohony molekulární destruktory	26 kW
Dusíkový generátor	23 kW
Čištění pyrolýzního plynu	16,6 kW
Stratifikační zásobník	13 kW
Kogenerační jednotka	7,4 kW
Mikrokogenerační jednotka se Stirlingovým motorem	2,7 kW
Směšovací stanice	1,2 kW

Jak si lze všimnout, tak mezi největší spotřebiče v TCO patří pyrolýzní jednotka společně s dopravníky, které slouží k dopravě materiálu do oné pyrolýzní jednotky. Z tabulky 5 si lze všimnout, že mezi spotřebiče také spadá i kogenerační jednotka i Stirlingův motor. Tyto zdroje elektrické energie jsou zároveň i spotřebiči, protože při rozběhu spotřebovávají elektrickou energii jako například Stirlingův motor, který je roztáčen ze sítě svým asynchronním strojem.

6.1 Pyrolýzní jednotka

Pyrolýza patří spolu se spalováním a zplyňováním mezi procesy termochemické konverze. Tyto procesy se navzájem výrazně odlišují v obsahu kyslíku v reakčním prostoru.

Na rozdíl od zplyňování a spalování je pyrolýzní proces využíváný pro vývoj inovativních technologií založen na rozkladu organických látek působením tepla bez přístupu oxidačních médií. V technické praxi bývá tento proces dělen do třech kategorií podle používaných teplot, a to na procesy nízkoteplotní ($< 500\text{ }^{\circ}\text{C}$), středoteplotní ($500 - 800\text{ }^{\circ}\text{C}$), vysokoteplotní ($> 800\text{ }^{\circ}\text{C}$). [34] Při tepelném rozkladu klesá stabilita vysokomolekulárních látek, což vede k jejich štěpení s uvolňováním látek nízkomolekulárních. V podstatě při tepelném rozkladu dochází k

uvolnění prchavé hořlaviny z tuhého odpadního materiálu, kterým mohou být pneumatiky, plasty, brusné kaly, biomasa, uhlí, kaly z čistíren odpadních vod a další. Termickým rozkladem vstupních materiálu v pyrolyzním procesu vznikají z pravidla tři hlavní produkty: karbonizační pevný zbytek, kapalný kondenzát, pyrolyzní plyn. [34]

Tyto výstupy z pyrolyzní technologie lze využít jako opětovnou vstupní surovinu k dalšímu zpracování, ale především k výrobě tepelné a elektrické energie.

Mechanicky upravený materiál je navážen na požadovanou hmotnost a následně nadávkován pasovým dopravníkem do hermeticky uzavřeného zásobníku, který je proplachován inertním plynem, aby se zamezilo přístupu okysličovacích medií do pyrolyzního procesu. Jakmile je pec vyhřátá na požadovanou teplotu je materiál postupně dávkován do pyrolyzní retorty. Minimální doba setrvání materiálů v pyrolyzní jednotce je 30 minut.



Obr. 11 Pyrolyzní jednotka

6.2 Dopravníky

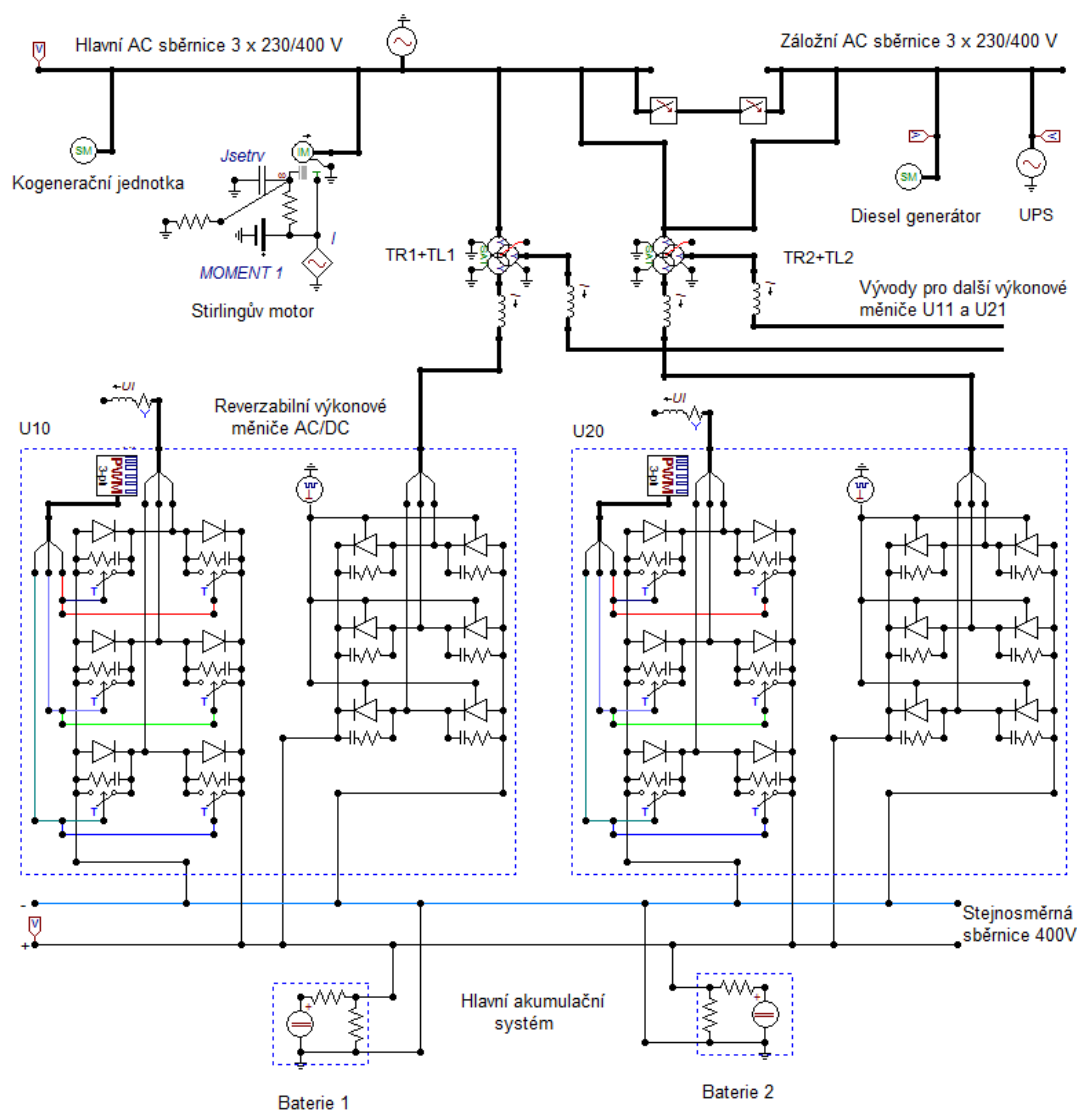
Dopravníkový systém v TCO patří, jak již bylo zmíněno u pyrolýzy k nejdůležitější součásti spotřeby v TCO, nebo pomocí těchto dopravníků je dopravováno palivo do spalovacích jednotek. Příkon těchto dopravníků činí 120 kW.

7 Model technologického centra Ostrava

7.1 Model jednotlivých energetických zdrojů pomocí softwaru

V této části je ukázka rozpracovaného počítačového modelu jednotlivých komponentů, který byl vytvořen v prostředí EMTP-ATP viz Obr. 12. Model vychází z blokového schéma, na kterém jsou zobrazeny reálné energetické zdroje, které se v TCO nacházejí.

Topologie modelu jednotlivých zdrojů elektrické energie TCO je tvořena hlavní napájecí AC sběrnici 3x230/400 V a záložní AC sběrnici 3x230/400 V. K této sběrnici jsou připojeny hlavní zdroje, jako je kogenerační jednotka s výkonem 100 kW a Stirlingův motor s výkonem 10 kW. Jakmile nastane situace, kdy je TCO odpojeno od dodávky elektrické energie ze sítě a jsou vyčerpány vlastní akumulací kapacity, je v záloze diesela agregát a jednotka UPS.



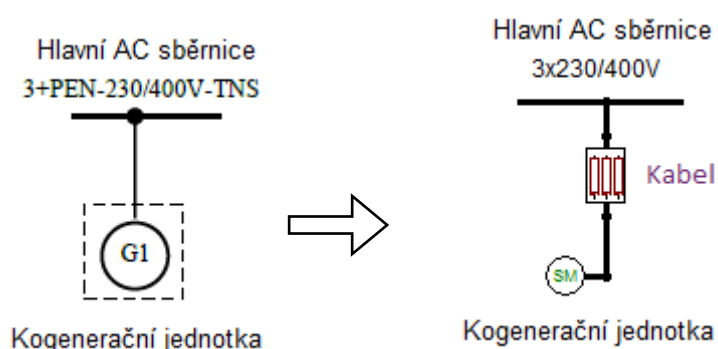
Obr. 12 Část vytvořeného modelu pomocí programu ATPDraw [1], [2], [6], [8], [12], [18], [28]

Na hlavní DC sběrnici 400 V jsou připojeny dvě hlavní akumulační jednotky, které se skládají z pěti do série spojených olovených akumulátorových bloků. Jelikož software EMTP-ATP neumožňuje spojovat nezátížené zdroje do série. Musela se paralelně připojit ke každému zdroji zátěž v podobě rezistoru.

7.1.1 Informace o namodelovaných zdrojích

- **Kogenerační jednotka**

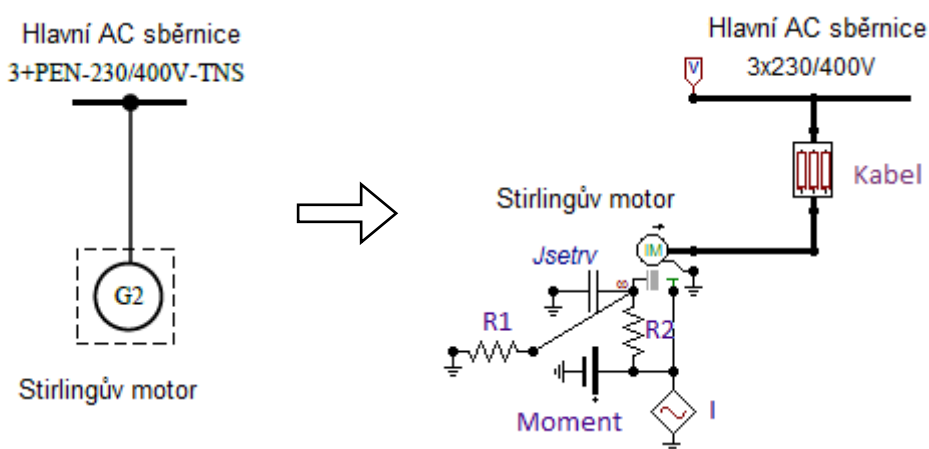
Synchronní generátor je v dynamickém modelu přímo vygenerován z nabídky “Machine” typ SM59_NC.



Obr. 13 Kogenerační jednotka v blokovém zapojení nahrazena modelem v ATPDraw [2], [30], [31]

- **Stirlingův motor**

Asynchronní motor je v dynamickém modelu vybrán z nabídky “Machine” typ UM_3.



Obr. 14 Stirlingův motor v blokovém zapojení nahrazen modelem v ATPDraw [1], [2], [14], [28], [31]

Podle Obr. 14 použité veličiny splňují funkci [28]:

Jmenovité zatížení stroje (Moment)

M (N·m) v ATPDraw je respektován stejnosměrným proudovým zdrojem.

Moment setrvačnosti (Jsetrv)

J (kg·m²) v ATPDraw je respektován připojením kapacitou paralelně k obvodu. Hodnota kapacity je v jednotkách Farad to odpovídá hodnotě momentu setrvačnosti v jednotkách kg·m². Protože je hodnota kapacity v ATPDraw zadávána v jednotkách μF , platí pro hodnotu kapacity C (μF).

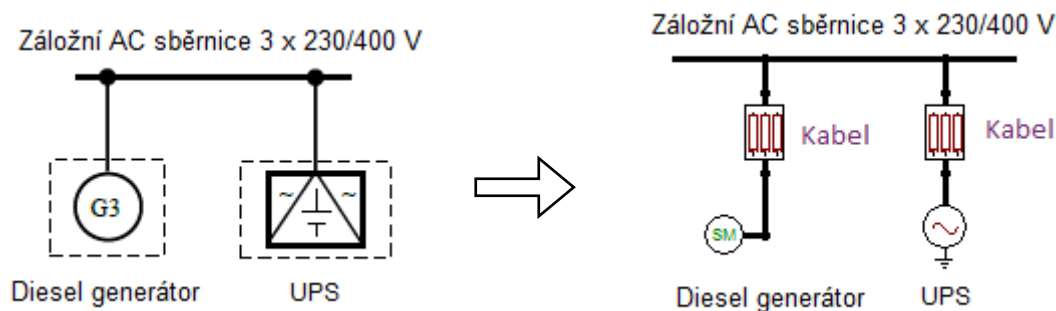
Tření na hřídeli a inicializace

V obvodu je použit rezistor s indexem R1, který modeluje tření na hřídeli, jedná se o mechanický parametr. Velikost tohoto odporu je závislá na mechanických ztrátách tj. ztráty ventilací a ztráty vzniklé třením v ložiscích. Jeho hodnota v $\text{N}\cdot\text{m}/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$ se v obvodu udává jako vodivost, přičemž odpovídá R (Ω).

Druhý rezistor s indexem R2 společně s proudovým zdrojem I tvoří inicializaci stroje a jeho velikost je obvykle 0,1 Ω .

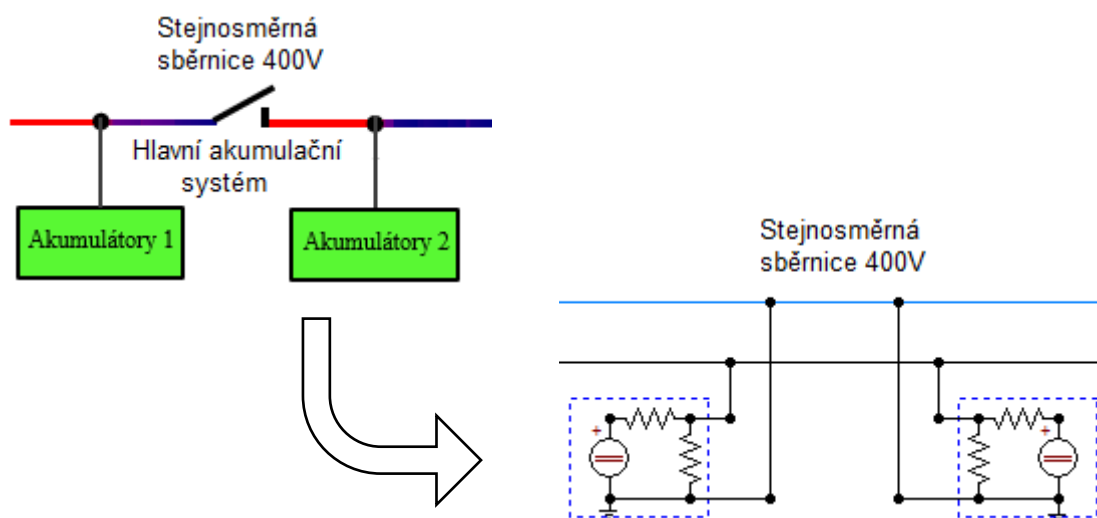
- **Dieselagregát a jednotka UPS**

V technologickém centru je jako záložní system nainstalován dieselagregát společně s jednotkou UPS. Jednotka UPS je v tomto případě namodelována jako 3 fázový napěťový zdroj. Synchronní generátor dieselagregátu je v dynamickém modelu vygenerován z nabídky “Machine” typ SM59_NC.



Obr. 15 Dieselagregát a UPS v blokovém zapojení nahrazeny modelem v ATPDraw [2], [30], [31]

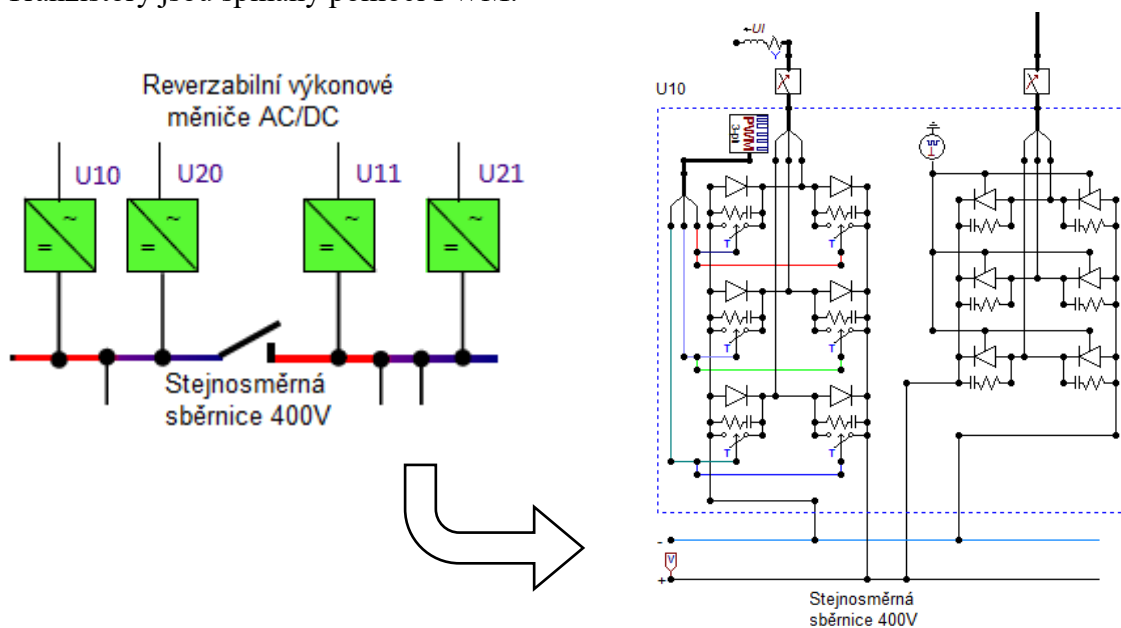
- **Akumulátorovna**



Obr. 16 Hlavní akumulátory v blokovém zapojení nahrazeny modelem v ATPDraw [2], [10], [12], [15]

- **Reverzabilní výkonové měniče**

Měnič AC/DC je namodelován jako 6 – ti pulzní usměrňovač s přepět'ovými ochranami u tyristorů, kde na výstupu z měniče je hodnota stejnosměrného napětí 400 V. Naopak třífázový střídač DC/AC je namodelován pomocí tranzistorů s přepět'ovými ochranami. Ke každému tranzistoru je antiparalelně připojena zpětná dioda. Jako celek tvoří zpětné diody tzv. zpětný usměrňovač, který umožňuje „usměrňovačový chod“ a odběr jalového výkonu zátěží. Tranzistory jsou spínány pomocí PWM.



Obr. 17 Reverzibilní měnič v blokovém zapojení nahrazen modelem v ATPDraw [2], [6], [8], [9], [28]

7.2 Využití počítačového modelu k simulaci parametrů měniče

Pomocí grafického preprocesoru ATPDraw byl vytvořen ekvivalentní model analyzované sítě.

Simulace se zvolila především, aby se sledoval tok elektrické energie z akumulátoru do distribuční sítě právě přes výkonový měnič.

Následující model je vytvořen pomocí výše zmíněného softwaru. Tento model se skládá ze zapojení jednoduchého DC zdroje (baterie), zvyšujícího řízeného dvou kvadrantového DC/DC měniče a řízeného DC/AC střídače.

- DC/DC měnič je řízen pomocí pilového zdroje TRI s periodou 2,5 μs , složky konstantního stejnosměrného napětí přes komparátor až na řídící elektrody tyristoru.
- DC/AC střídač je řízen pomocí pulzně šířkové modulace PWM s periodou 1 ms.

Celé zapojení je pak připojeno ke střídavé síti. V této simulaci je monitorován tok elektrické energie mezi stejnosměrným zdrojem přes výkonový měnič do střídavého zdroje.

Potřebné parametry jednotlivých zdrojů, které jsou potřebné pro simulaci, jsou uvedeny v tabulce 10. [3]

Tabulka 6 Informace potřebné pro simulaci [25]

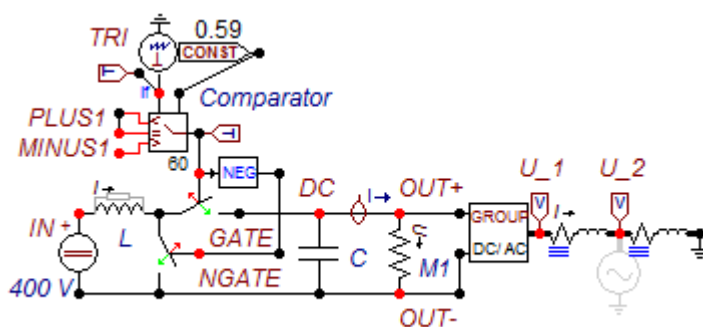
Informace o zdrojích					
DC zdroj napětí		3-fázový zdroj napětí		Zátěž 160 kW	
U_{bc}	400 V	U_{fm}	327 V	R	1 Ω
TRI perioda	2,5 μs	PWM perioda	1 ms		
		Konstanta	0,59		

Pro určení hodnoty rezistoru R , který odpovídá velikosti zátěže 160 kW, je použit následující vzorec (1):

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{400^2}{160 \cdot 10^3} = 1 \Omega \quad (1)$$

Energetická bilance přenosu je provedena v čase $T_{\max} = 50$ ms a krokem výpočtu $\Delta T = 0,1$ μs .

Schéma z Obr. 17 bylo modifikováno.



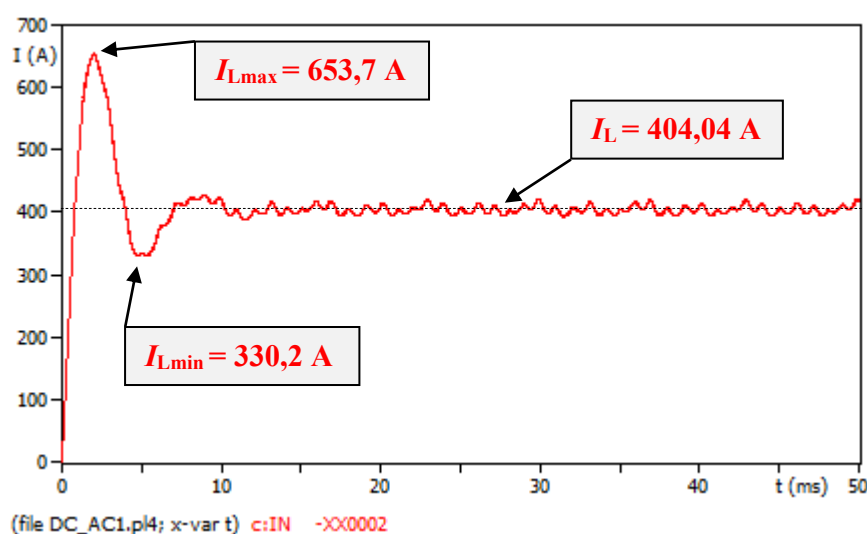
Obr. 18 Zjednodušené schéma pro simulaci přenosu energie [3], [5], [6], [10], [25], [29], [31]

Obvod řízení DC/DC měniče a obvod řízení DC/AC střídače bylo zjednodušeno. Obvod řízení střídače je spínáno pomocí PWM s periodou $T = 1$ ms.

Pro určení vstupního výkonu DC/DC měniče (výkonu baterie) byla použita rovnice (2). V této rovnici je pro stejnosměrné napětí zvolena hodnota $U = 400$ V, která je konstantní a proud I_L , který prochází indukčností $L = 0,7$ mH. Proud ve vzorci je uveden v obecném tvaru, neboť jeho průběh je nasimulován při stavu, kdy dojde k sepnutí stejnosměrného zdroje. Průběh tohoto proudu je zobrazen na Obr. 19.

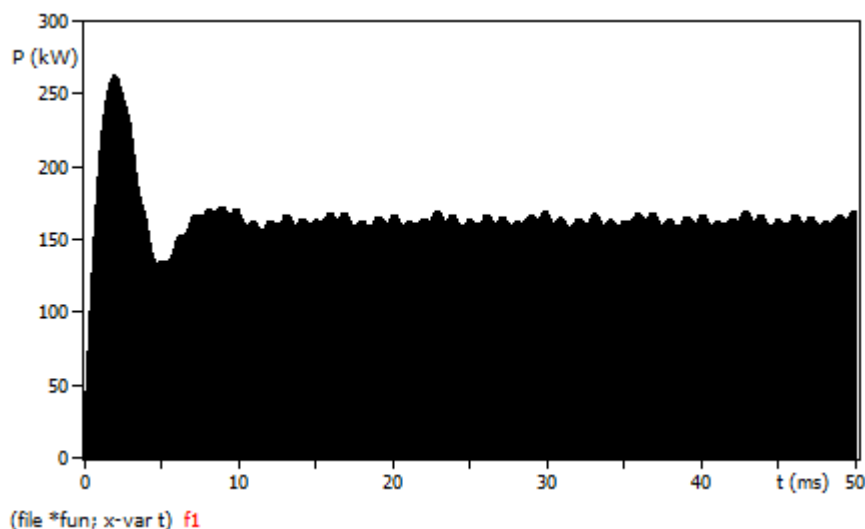
Velikost indukčnosti L byla zvolena tak, aby se zamezilo matematickým oscilacím na vstupní a výstupní straně DC/DC měniče.

$$\Delta P_{DC_IN} = U \cdot I_L = 400 \cdot I_L \text{ (W)} \quad (2)$$



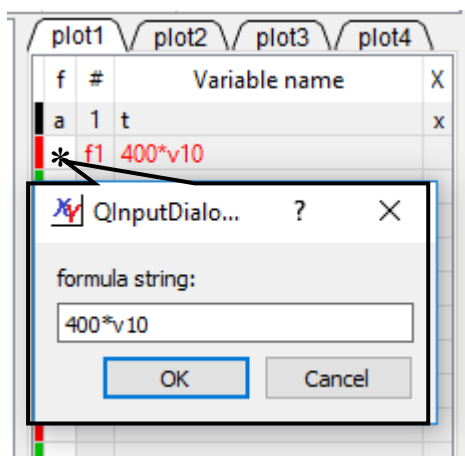
Obr. 19 Průběh proudu I_L na indukčnosti L při zapnutí DC zdroje

Pro vykreslení stejnosměrného výkonu P_{DC_IN} na DC zdroji znázorněného na Obr. 20 byla zvolena funkce „formula string“, kterou nalezneme v nabídce Plot XY. S touto funkcí lze graficky vykreslit jakýkoliv průběh zadané rovnice.



Obr. 20 Průběh vstupního stejnosměrného výkonu P_{DC_IN} , který je dodáván z DC zdroje

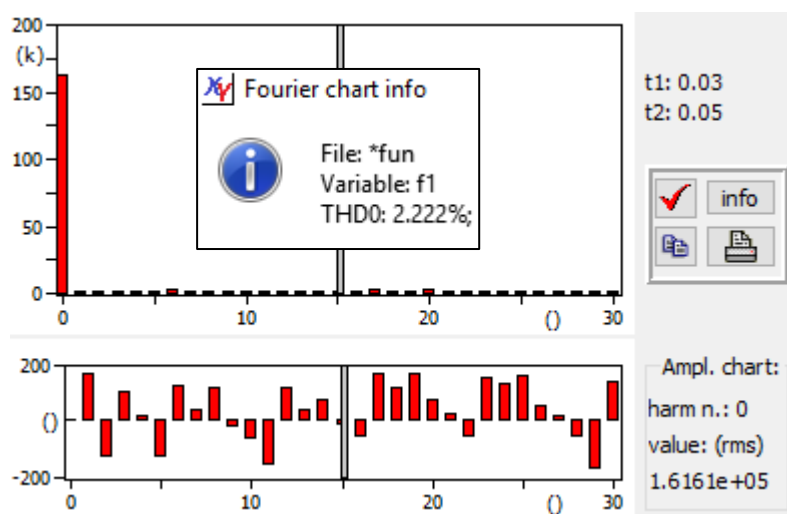
V tomto případě byla do funkce aplikována rovnice ve tvaru „400*v10“, která reprezentuje rovnici (2). Parametr „v10“ je hodnota proudu I_L , který prochází indukčností v době zapnutí zdroje.



Obr. 21 Výřez okna Plot XY s danou funkcí “formula string” – ilustrační obrázek

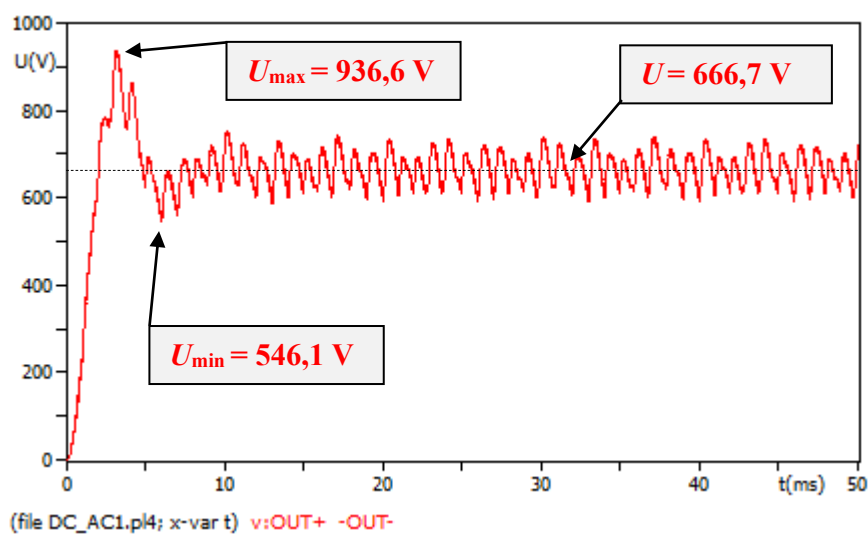
Velikost vstupního stejnosměrného výkonu, lze vyjádřit z průběhu na Obr. 20, nebo také pomocí Fourierovy transformace. Tato transformace nám určuje jak kvalitu stejnosměrného výkonu dle harmonických hodnot, tak i jeho velikost. Zde je zřejmé, že DC zdroj je schopen dodat výkon 161,61 kW (vstupní výkon DC/DC měniče).

Kvalitu signálu, lze určit pomocí THD, které je v tomto případě 2,222% tzn., že zkreslení hodnoty výkonu 1. harmonické je minimální, protože čím nižší je THD, tím je signál věrnější.

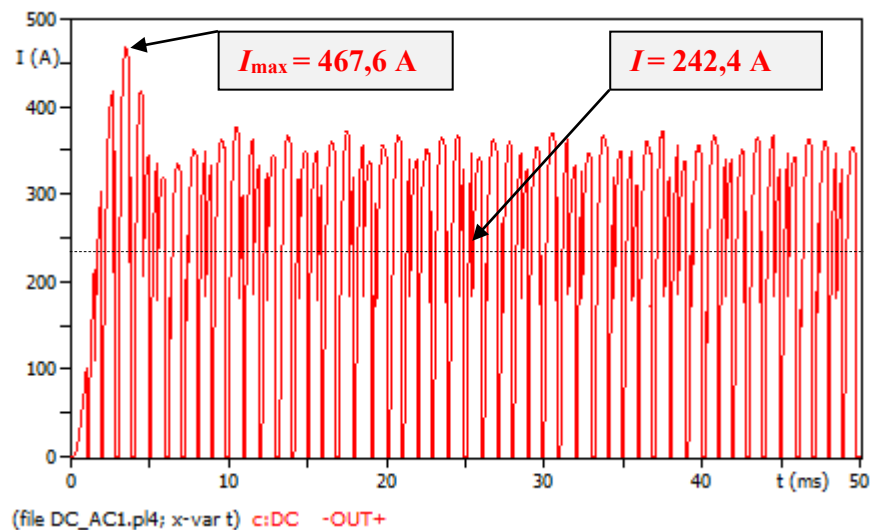


Obr. 22 Výsledek simulace vstupního výkonu P_{DC_IN} na DC zdroji pomocí Fourierovy transformace

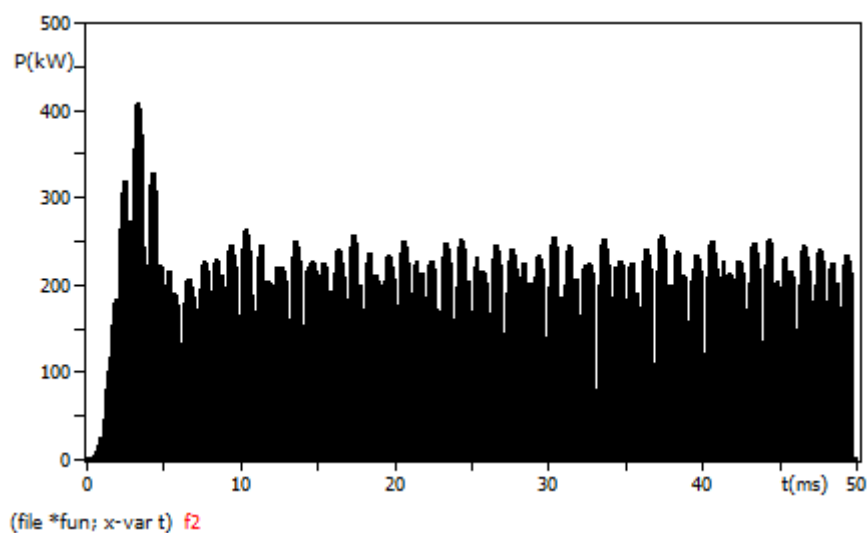
Pro určení ztrát ΔP_{DC} , které vzniknou na DC/DC měniči je potřeba určit výstupní hodnotu výkonu P_{DC_OUT} . V tomto případě je výkon dán součinem výstupního napětí mezi svorkami OUT + a OUT -, které je nasimulováno a zobrazeno na Obr. 23, a výstupního proudu I, který je změřen pomocí proudové sondy. Tento průběh je simulací a je zobrazen na Obr. 24.



Obr. 23 Simulace výstupního napětí z DC/DC měnič na svorkách OUT+ a OUT -

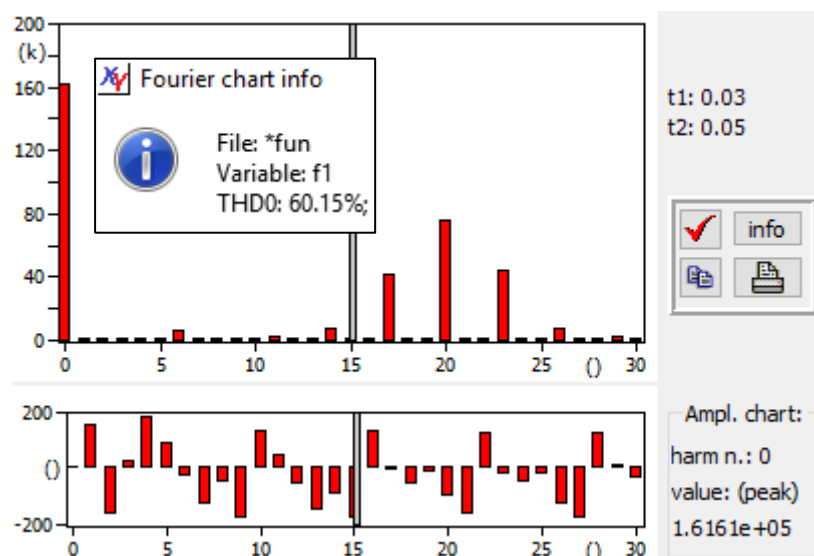


Obr. 24 Simulace výstupního proudu z DC/DC měniče na proudové sondě



Obr. 25 Průběh výstupního stejnosměrného výkonu P_{DC_OUT} z DC/DC měniče

Z výše uvedených nasimulovaných průběhů napětí a proudu na výstupní straně DC/DC měniče je patrný i jeho výstupní výkon P_{DC_OUT} , který je odečten z hodnot Fourierovy transformace. Hodnota výstupního výkonu činí 161,61 kW.



Obr. 26 Výsledek simulace výstupního výkonu P_{DC_OUT} na DC/DC měniči dle Fourierovy transformace

Lze si povšimnout, že hodnota THD v tomto případě je rovna 60,15 % z toho vyplývá, že daný průběh výstupního výkonu je zkreslený v porovnání s vstupním výkonem, kde THD činilo pouze 2,222 %. To může být způsobeno výkyvem hodnot 17., 20. a 23. harmonické.

Porovnáním vstupního výkonu P_{DC_IN} , který je schopen dodávat DC zdroj a který je zároveň vstupujícím výkonem do DC/DC měniče a porovnáním výstupního výkonu P_{DC_OUT} , který vystupuje z měniče, lze určit i ztráty, které vznikají právě na měniči. Odečtením vstupního a výstupního výkonu dostaneme výkonové ztráty ΔP_{DC} .

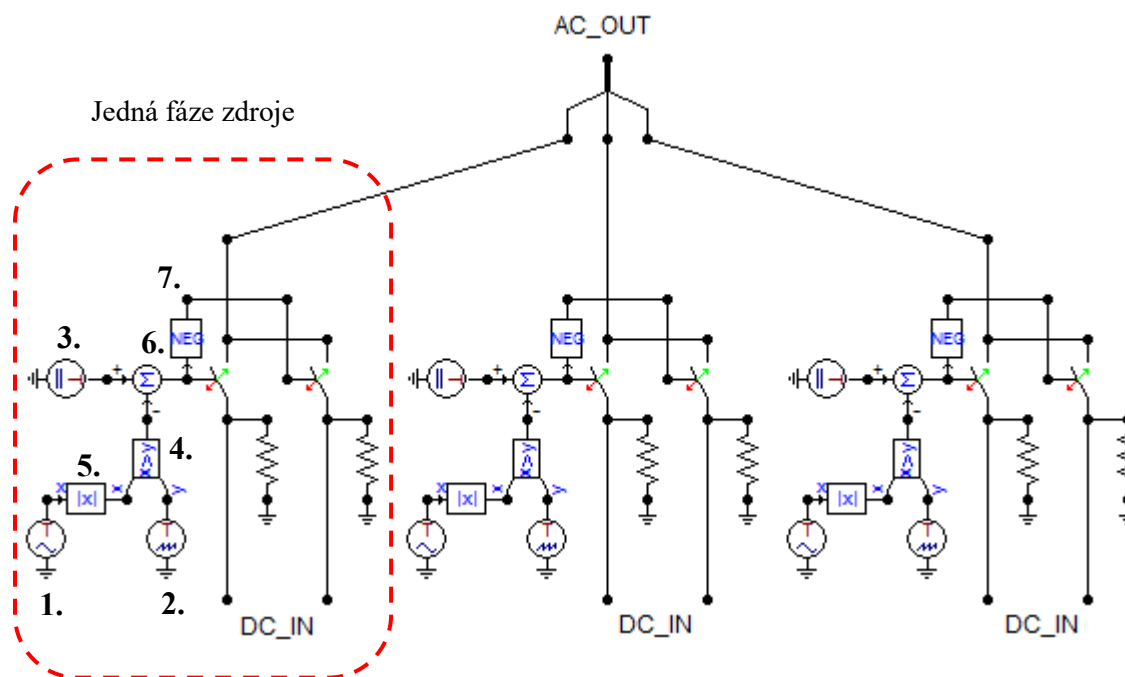
$$\Delta P_{DC} = P_{DC_IN} - P_{DC_OUT} = 161,61 \cdot 10^3 - 161,61 \cdot 10^3 = 0 \text{ kW} \quad (3)$$

Jak už vyplývá z rovnice (3), tak ztráty na DC/DC měniči jsou nulové. Skutečné ztráty, které vznikají na měniči, jsou určeny dle velikosti rezistoru M1, který má hodnotu 1 k Ω . Jelikož v obvodu měniče není zapojen žádný jiný rezistor, tak velikost ztrát je 444,45 W, které jsou určeny podle rovnice (4).

$$\Delta P = \frac{U^2}{R} = \frac{666,67^2}{1000} = 445,45 \text{ W} \quad (4)$$

Skutečná velikost ztrát, které vznikají na měniči, jsou dány pouze na rezistoru M1.

Z důvodů určení parametrů na DC/AC střídači bylo potřeba sestavit v programu ATPDraw řízený střídač. Existuje celá řada principiálně odlišných DC/AC metod řízení, nejčastější je to metoda tzv. pulzně šířkové modulace. Tento střídač byl následně zjednodušen do bloku GROUP DC/AC, tak jak je to možno vidět na Obr. 18.



Obr. 27 Schéma PWM zdroje – situace v prostředí ATPDraw [3], [18],[20], [29], [31]

Funkční prvky matematického modelu PWM zdroje:

1. Zdroj obecného sinusového signálu
2. Zdroj obecného pilového signálu
3. Zdroj obecného konstantního signálu
4. Logický operátor $X > Y$
5. Matematický operátor – absolutní hodnota
6. Matematický operátor $X + Y$
7. Matematický operátor - negace

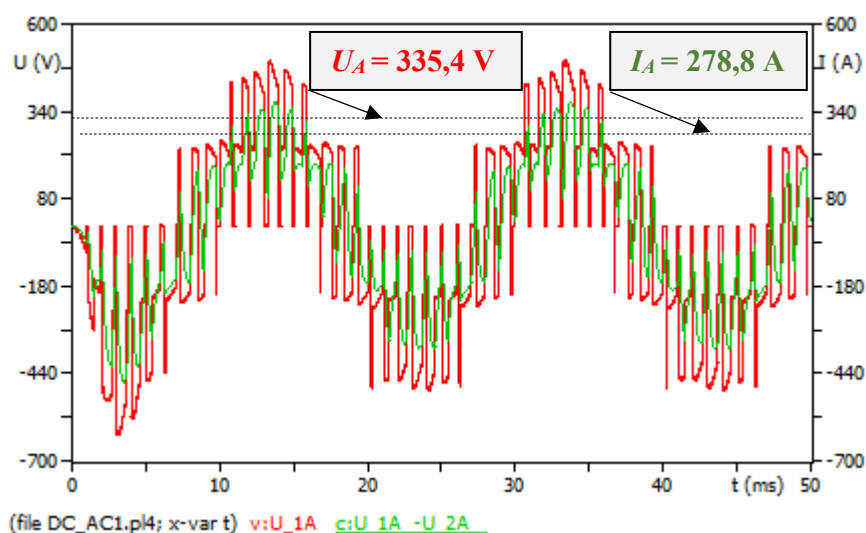
Popis funkce pulzně šířkově modulovaného zdroje:

Blokové a zároveň situační schéma PWM zdroje v prostředí ATPDraw je zobrazeno Obr. 27. V prostředí ATPDraw je modelován pomocí funkčních bloků nabídky TACS (Transient analysis control signal). Jedná se především o logické bloky (Booleova algebra), matematické bloky (sčítání, derivace, goniometrické funkce atp.) či zdroje signálu (sinusový, pilový stejnosměrný atd.) pro možnost vytvoření obecného řídicího signálu.

PWM pracuje na principu vzájemné interakce mezi sinusovým a pilovým signálem. Je použita logická funkce (TACS) „větší než“. Tedy je-li absolutní hodnota amplitudy sinusového signálu větší, než amplituda pilového signálu, zapíše se na výstupu funkčního bloku logická 1, v opačném případě 0.

Hodnota amplitudy pilového signálu je zvolena 1, hodnota amplitudy sinusového signálu je 0,9 a úhel mezi fázemi je vzájemně posunut o 120° . Hodnota konstantního signálu je 1. Je to z důvodu, aby tato metoda fungovala i při maximální hodnotě sinusového signálu.

Jelikož hodnota RL zátěže $R = 1,2 \Omega$ a $L = 0.1 \text{ mH}$ je ve všech fázích stejná, tudíž i výkon ve fázích bude stejný, proto uvádím simulaci jen pro jednu fázovou hodnotu. Zapojení zátěže RL je spojeno do hvězdy.



Obr. 28 Simulace výstupního napětí a proudu z DC/AC střídače ve fázi A

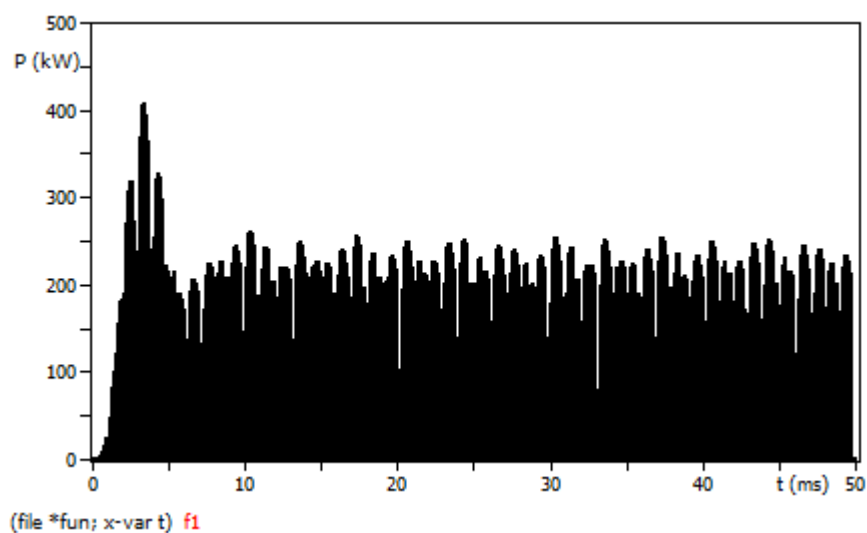
Z daného průběhu dle Obr. 28 lze stanovit hodnoty napětí a proudu.

$$U_A = 335,4\text{V} \quad I_A = 278,8\text{A}$$

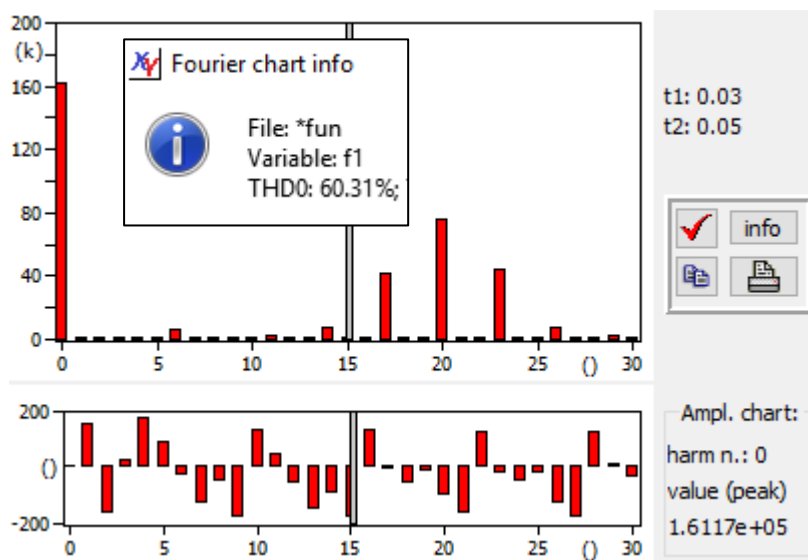
Celkový výkon na výstupní straně střídače je určen, jako součet výkonů jednotlivých fází tento výkon je znázorněn rovnicí (5), nebo podle vzorce (6).

$$P_{AC_OUT} = P_A + P_B + P_C \quad (W) \quad (5)$$

$$P_{AC_OUT} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \quad (W) \quad (6)$$



Obr. 29 Průběh celkového výstupního výkonu P_{AC_OUT} z DC/AC střídače



Obr. 30 Výsledek simulace výstupního výkonu P_{AC_OUT} na DC/AC střídači dle Fourierovy transformace

Lze si povšimnout, že hodnota THD je v tomto případě je rovna 60,15 %. Z toho vyplývá, že daný průběh výstupního výkonu je zkreslený. To může být způsobeno výkyvem hodnot 17., 20. a 23. harmonické.

Celkový výkon na výstupní straně střídače je určen, jako součet výkonů jednotlivých fází tento výkon je znázorněn rovnicí (7). Pro určení výkonových ztrát, které vznikají na střídači je potřeba znát výkon, který vstupuje do střídače a také výkon, který ze střídače vystupuje. Vstupním výkonem do střídače je také výstupní výkon z měniče, proto tento výkon můžeme také nazvat jako P_{DC_OUT} .

$$\Delta P_{AC} = P_{DC_OUT} - P_{AC_OUT} \quad (W) \quad (7)$$

$$\Delta P_{AC} = 161,61 \cdot 10^3 - 161,17 \cdot 10^3 = 440W \quad (8)$$

8 Charakteristika naměření

Data, která jsou potřebná pro analýzu, byla naměřena pomocí analyzátoru BK – ELCOM na reverzibilním výkonovém měniči.

Toto měření proběhlo na výkonovém reverzibilním měniči U10 zobrazeného na Obr. 35, který byl umístěn v rozváděči akumulátorovny Technologického centra. Na vstup měniče byl připojen analyzátor napětí a proudů BK – ELCOM model ENA 500.12, kterým se sledovaly měřené parametry.

8.1 Sdružený analyzátor sítí BK – ELCOM provedení ENA500.12

Sdružený analyzátor sítí BK – ELCOM slouží pro monitoring a analýzu kvality elektřiny v souladu s platnými normami. Model ENA500.12 je kompaktní analyzátor kvality elektřiny bez displeje. Přístroj je vybaven čtyřmi napěťovými a proudovými vstupy. Proudů se měří nepřímo použitím klasických proudových kleští s železným jádrem nebo flexibilních Rogowského cívek - AmpFLEX. [37], [38]



Obr. 31 Analyzátor BK – ELCOM v provedení ENA500.12 [37], [38]

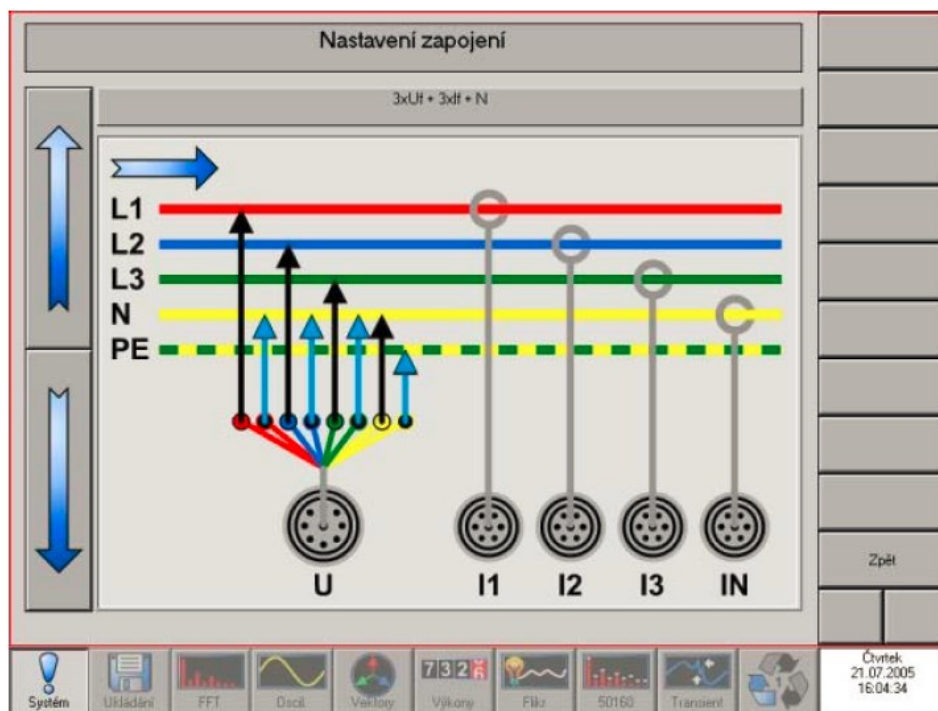
8.1.1 Volba zapojení analyzátoru pro měření

Nastavení analyzátoru spočívá ve volbě zapojení měřicího přístroje, měřících napěťových rozsahů a proudových vstupů a nastavení jednotlivých modulů. Pro upravení potřebných parametrů zvolíme tlačítko **Nastavení**, které nám zpřístupní grafický panel se základními informacemi o nastavení analyzátoru:

- Nastavené napěťové a proudové rozsahy
- Přepočítací konstanty převodů měřících transformátorů proudů a napětí
- Zapojení
- Vzorkovací frekvence pro transientní zapisovač
- Úroveň referenčního napětí pro monitor napětí podle ČSN EN 50160
- Jmenovitá frekvence (50 Hz – 60 Hz)
- Krok pro analýzu spekter (harmonické – mezipharmonické)
- Mód analyzátoru (reálné měření – simulace)

Volba způsobu zapojení analyzátoru do sítě umožňuje zvolit některý z osmi základních způsobů měření. Tento způsob se provádí po stisku tlačítka **Zapojení**. [37], [38]

3xUf+3xIf+N	trojfázové měření + N – tři fázová napětí a tři proudy + fáze N
3xUf+3xIf	trojfázové měření – tři fázová napětí a tři proudy
3xUs+3xIs	trojfázové měření – tři sdružená napětí a tři proudy
3xUf+2xIf	trojfázové měření – tři fázová napětí a dva proudy (třetí proud se dopočítává)
2xUs+2xIs	trojfázové měření – dvě sdružená napětí a dva proudy
1xUf+1xIf	jednofázové měření
3xUf+3xIf Y/D	trojfázové měření – tři fázová napětí a tři proudy, pro analýzu podle ČSN EN 50160 se napětí přepočítává na sdružené
3xUf+3xIf Y/D + N	trojfázové měření – tři fázová napětí a tři proudy + fáze N, pro analýzu podle ČSN EN 50160 se napětí přepočítává na sdružené
3xUf+2xIf Y/D	trojfázové měření – tři fázová napětí a dva proudy



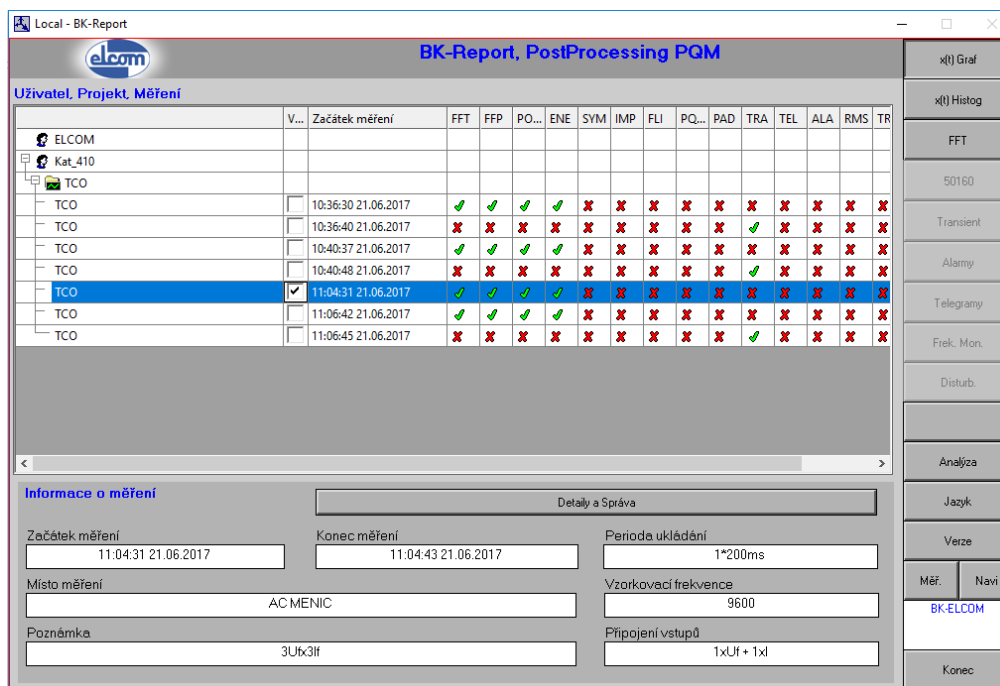
Obr. 32 Volba způsobu připojení analyzátoru do měřené sítě [38]

8.1.2 Analýza naměřených dat v časové oblasti

Analýzátor se dodává s nainstalovaným programem pro vlastní měření a odděleným programem pro analýzu dat. Jako komunikační a vizualizační jednotka tomuto měřicímu přístroji slouží standardní notebook (PC). Ten umožňuje konfigurovat, spouštět a zastavovat měření, prohlížet a stahovat naměřená data. Pro komunikaci notebooku s měřicí částí lze využít lokální počítačovou síť (Ethernet), popř. u novějších přístrojů bezdrátové připojení Wi-Fi.

K analýze naměřených dat analyzátoru BK-ELCOM slouží samostatný softwarový modul pro zpracovávání naměřených dat BK – Report. Lze jej tedy spustit i na jiném počítači a umožňuje analýzu naměřených dat ve tvaru např. protokolu z měření. Protokol je možno vytisknout či uložit jako soubor formátu bmp., popř. naměřená data exportovat do textového souboru. Pro zpracovávání naměřených dat má uživatel na počátku analýzy k dispozici stromovou strukturu všech dat, které se nacházejí v daném archivu naměřených dat. Je možné si vybrat až dvě měření pro srovnávání a analýzu. [38]

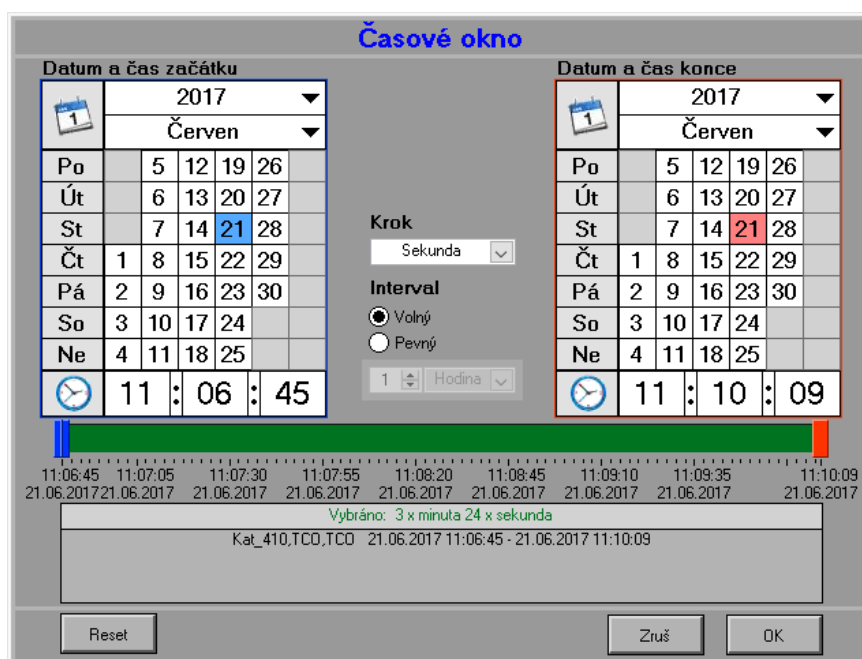
Uživatel má možnost vybrat si jeden z uvedených pohledů nad vybraným měřením. Standardně má k dispozici dva grafy do protokolu, do nichž lze vybrat libovolnou měřenou veličinu. Grafy jsou vybaveny kurzory s možností lupy.



Obr. 33 Hlavní panel s výběrem naměřených dat a volbou zpracování v časové oblasti

Po výběru typu zpracování dat v časové oblasti stiskem tlačítka **x(t) Graf** a následným stiskem tlačítka **Analýza** vpravo na hlavním panelu se objeví dialog pro výběr časového okna analýzy naměřených dat.

Po stisku tlačítka **Analýza** se objeví dialog výběru časového okna pro analýzu naměřených dat, ve kterém je zobrazen celý časový interval uložený ve vybraném měření.



Obr. 34 Výběr časového okna pro analýzu dat

8.2 Chyby měření a nejistoty měřicího přístroje

Pro každé přesné měření potřebujeme informaci o tom, s jakou chybou bylo měření provedeno. Nejistota měření vyjadřuje interval, ve kterém se nachází skutečná hodnota měřené veličiny s určitou pravděpodobností. Nejistota měření nezávisí jenom na přesnosti použitých přístrojů, ale také na zvolené metodě měření a dále na náhodných vlivech, které nemůžeme předem vyloučit. Podle způsobu vyhodnocení rozlišujeme nejistotu typ „A“ a typ „B“. [35]

Nejistota typu „B“ se využívá pro odhad standardní nejistoty hodnoty veličiny, která nebyla získána opakovaným měřením. Odhad standardní nejistoty typu „B“ je založen na informacích o možné variabilitě hodnot měřené veličiny.

Pro rovnoměrné rozložení budu počítat s hodnotou $k = \frac{2}{\sqrt{3}}$. Jelikož, byla změřená pouze jedna hodnota napětí a proudu pomocí digitálních přístrojů, je použita tato nejistota měření. [35]

Rovnoměrné rozložení pravděpodobnosti pro obě veličiny bylo zvoleno v tomto případě proto, že nemáme další informace o vnitřních jevech v přístroji, neznáme princip měření, způsob zaokrouhlení apod. Rovnoměrné rozlišení má v celém intervalu stejnou pravděpodobnost.

Přesnost digitálního měřicího přístroje je dána:

- přesností analogově/digitálního převodníku, např. 0,1 % (dáno počtem bit převodníku)
- chybou způsobenou počtem nejméně významných míst tzv. digitů (nejmenší rozlišitelný dílek), např. 2 digity [30], [35]

Všechny tyto parametry přístroje je možno nalézt v dokumentaci. U některých přístrojů lze nalézt i informaci přímo o nejistotě měření typu „B“.

Chybu přístroje udávají výrobci jako součet dvou členů a to dvěma způsoby:

- \pm (% chyby čtení + % chyby rozsahu), nebo
- \pm (% chyby čtení + počet digitů s nejmenší váhou (LSB)).

Absolutní chyba se vypočte dle vztahu:

$$\Delta u = \pm(\Delta u_{\text{čtení}} + n \cdot \text{LSB}) \quad (\text{V}) \quad (9)$$

kde:

n – počet digitů

LSB – nejnižší počet digitů

Relativní chyba se vypočte dle vztahu:

$$\delta x = \frac{\Delta u}{x} \cdot 100 \quad (\%) \quad (10)$$

kde:

x – naměřená hodnota

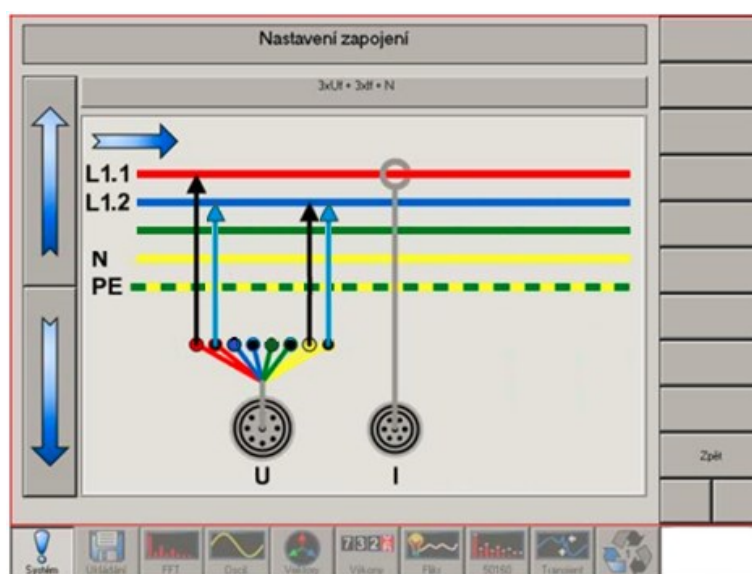
9 Analýza dat při nabíjení akumulátorů z DS

9.1 Popis průběhu měření

Měření probíhalo při zapnutém reverzibilním měniči, kde přívodem do měniče bylo střídavé síťové napětí, které přes odbočky napájecího transformátoru, bylo sníženo na požadovanou hodnotu. Síťové napětí nebylo 3 fázového charakteru, nýbrž bylo rozděleno na tři samostatné jednofázové průběhy. Toto napětí bylo následně 6 – ti pulzním usměrňovačem usměrněno pro nabíjení olověných akumulátorů.



Obr. 35 Vodou chlazený výkonový reverzibilní měnič U10 a jeho detail vnitřního zapojení



Obr. 36 Upravené připojení analyzátoru pro zvolený měnič U10

Pro daný typ měření bylo zvoleno zapojení typu $3xU_f+3xI_f+N$, které je zobrazeno na Obr. 32. Pro tento případ měření byla nutnost úpravy zapojení, protože fáze s označením např. L1.1 a L1.2 jsou stejné fáze, akorát jsou rozděleny na 2 samostatné, proto byly napěťové sondy připojeny vždy na stejnou fázi, tedy mezi indexy 1. a 2., jak je znázorněno na Obr. 36 a Obr. 37. Flexibilní proudová sonda obklopovala vždy jen jeden z příslušných párů vodičů dané fáze.



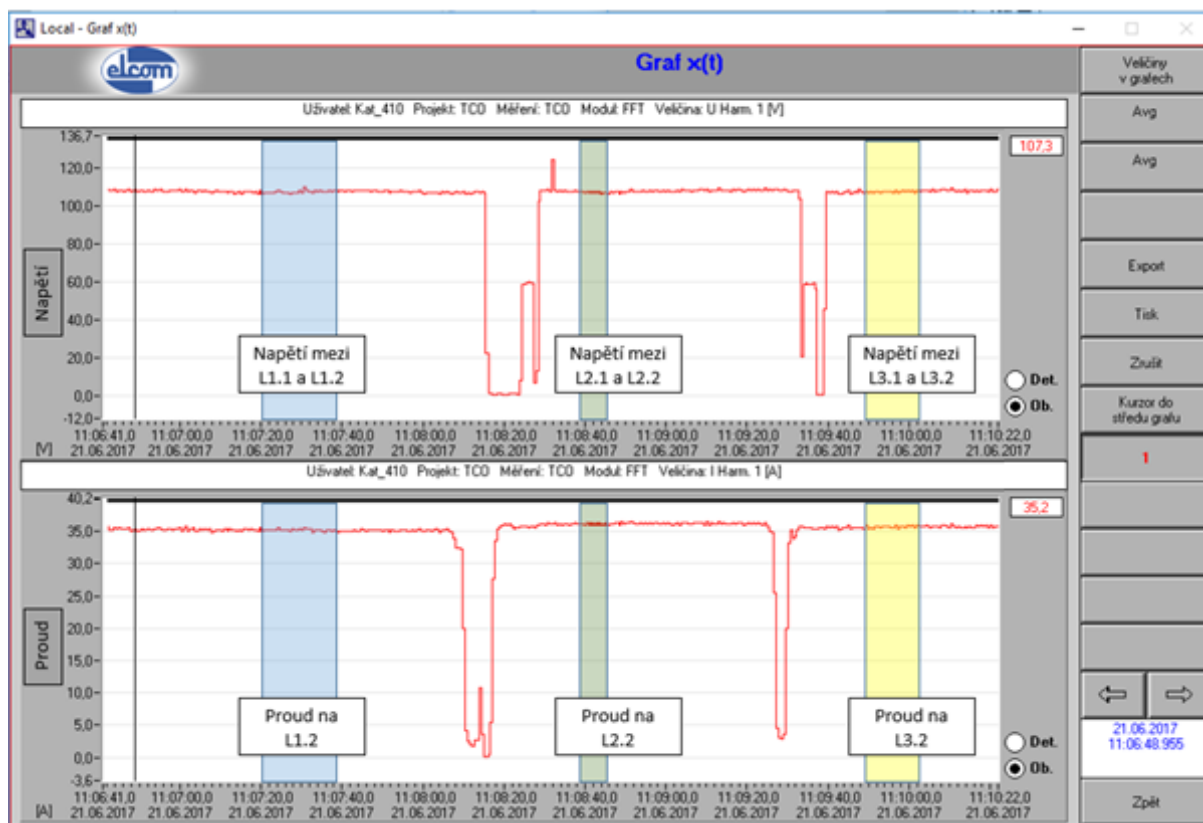
Obr. 37 Průběh měření a detail zapojení napěťové a flexibilní proudové sondy

Průběhy napětí a proudů na přívodu do měniče byly měřeny analyzátozem BK – ELCOM model ENA500.12. Hodnoty proudu byly snímány flexibilní sondou (Rogowského cívka – AmpFLEX), která obklopovala pouze jeden fázový vodič (např. fáze L1.2). Napětí bylo měřeno krokosvorkami, které byly zapojeny na sběrnicích stejné fáze (např. mezi fází L1.1 a fází L1.2).

Hodnota napětí na výstupní straně z měniče (DC strana) byla odečtena digitálním voltmetrem značky Fluke a hodnota proudu byla odečtena pomocí klešťového digitálního ampérmetru značky Fluke. Vzorkovací frekvence analyzátoru BK – ELCOM modelu ENA500.12 byla 9600 Hz.

Tabulka 7 Informace o měřených veličinách pro jednotlivé fáze v reálném čase

Přehled měřených veličin mezi jednotlivými fázemi v čase		
Mezi fázemi L1.1 a L1.2		
[h:min:s]		
11:07:20	11:07:29	11:07:39
Mezi fázemi L2.1 a L2.2		
[h:min:s]		
11:08:39	11:08:43	11:08:45
Mezi fázemi L3.1 a L3.2		
[h:min:s]		
11:09:49	11:09:56	11:10:03



Obr. 38 Průběhy napětí a proudů na jednotlivých fázích

V Tabulka 7 uvádím jednotlivé reálné časy z měření na výkonovém měniči, které proběhlo ze dne 21. 6. 2017, které jsou zaneseny do softwaru BK – Report. Pomocí těchto údajů lze ze softwaru vyčíst jednotlivé průběhy pro danou fázi měření a vynést tak příslušné grafy.

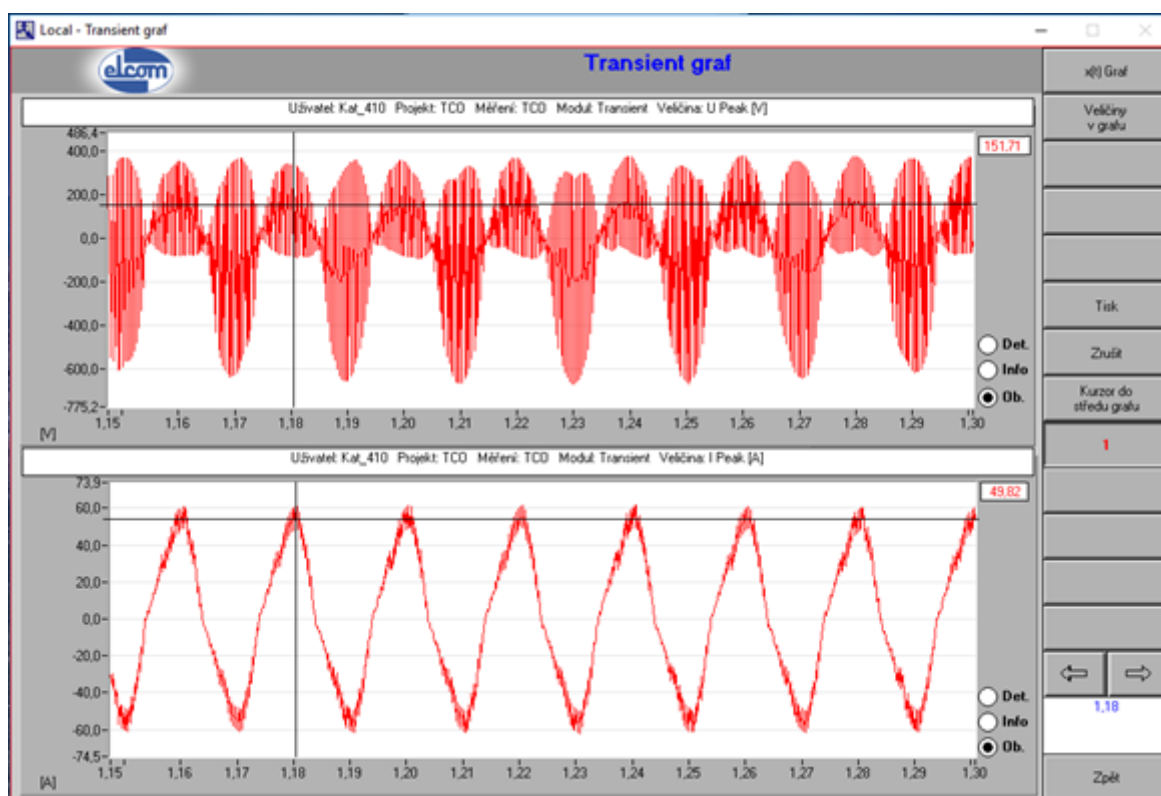
9.2 Simulace na počítačovém modelu

Pro nastavení hodnoty zdroje pro simulaci, je potřeba stanovit maximální hodnotu napětí, která pak následně bude znázorňovat hodnotu napětí zdroje. Tuto hodnotu jsem stanovil z průběhu Fourierovy transformace, hodnoty efektivního napětí a proudu jsou znázorněny na Obr. 38. Efektivní hodnota napětí je $U = 107,3 \text{ V}$ a efektivní hodnota proudu je $I = 35,2 \text{ A}$

Jelikož měřené napětí nebylo 3 – fázového charakteru, ale bylo rozděleno na 3 – jednofázové napětí, tak i samotný zdroj, který je zvolený v simulačním softwaru ATP Draw, je nastaven také, jako tři jednofázový zdroj.

$$U_m = U \cdot \sqrt{2} = 107,3 \cdot \sqrt{2} = 151,7\text{V} \quad (11)$$

$$I_m = I \cdot \sqrt{2} = 35,2 \cdot \sqrt{2} = 49,8\text{A} \quad (12)$$



Obr. 39 Průběh napětí a proudu v reálném čase na fázi L1

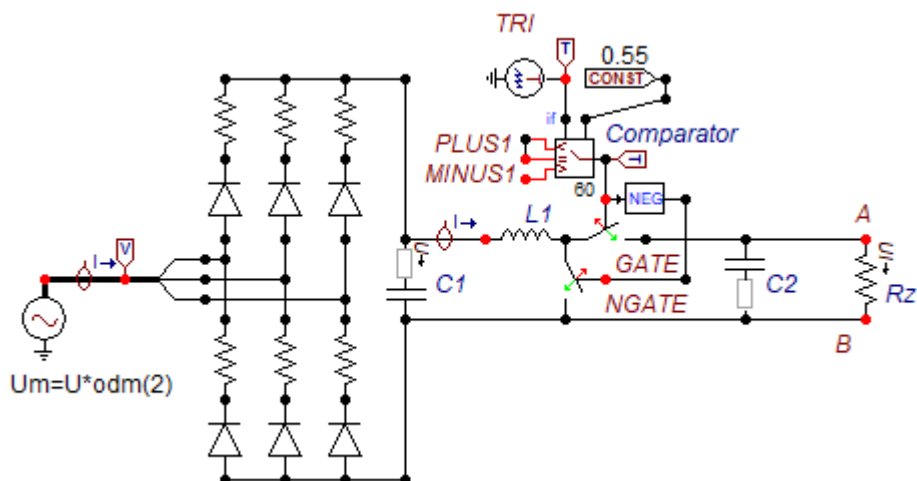
Jelikož je efektivní hodnota měřených fází stejná, tudíž jsem vynesl pouze jeden průběh, abych ověřil správnost výpočtu vůči měřené hodnotě napětí a proudu. V tomto případě jsou vyneseny měřené hodnoty na fázi L1.

Z průběhu na Obr. 39 lze vidět porovnání mezi vypočtenými hodnotami napětí a proudu a skutečným průběhem. V průběhu jsou vykresleny maximální hodnoty napětí a proudu, které jsou shodné s vypočtenými hodnotami. Tímto způsobem jsem ověřil správnost výpočtu.

Z průběhu si lze také všimnout velkého zkreslení vstupního napětí, které je přivedeno do měniče. Toto zkreslení je způsobeno rušením sítě.

Tabulka 8 Informace o měřených veličinách na vstupu a výstupu měniče

Naměřené hodnoty			
BK – ELCOM		FLUKE	
Vstup do měniče (AC strana)		Výstup z měniče (DC strana)	
U_{ef}	107,3 V	U_{DC}	455,4 V
I_{ef}	35,2 A	I_{DC}	21,5 A



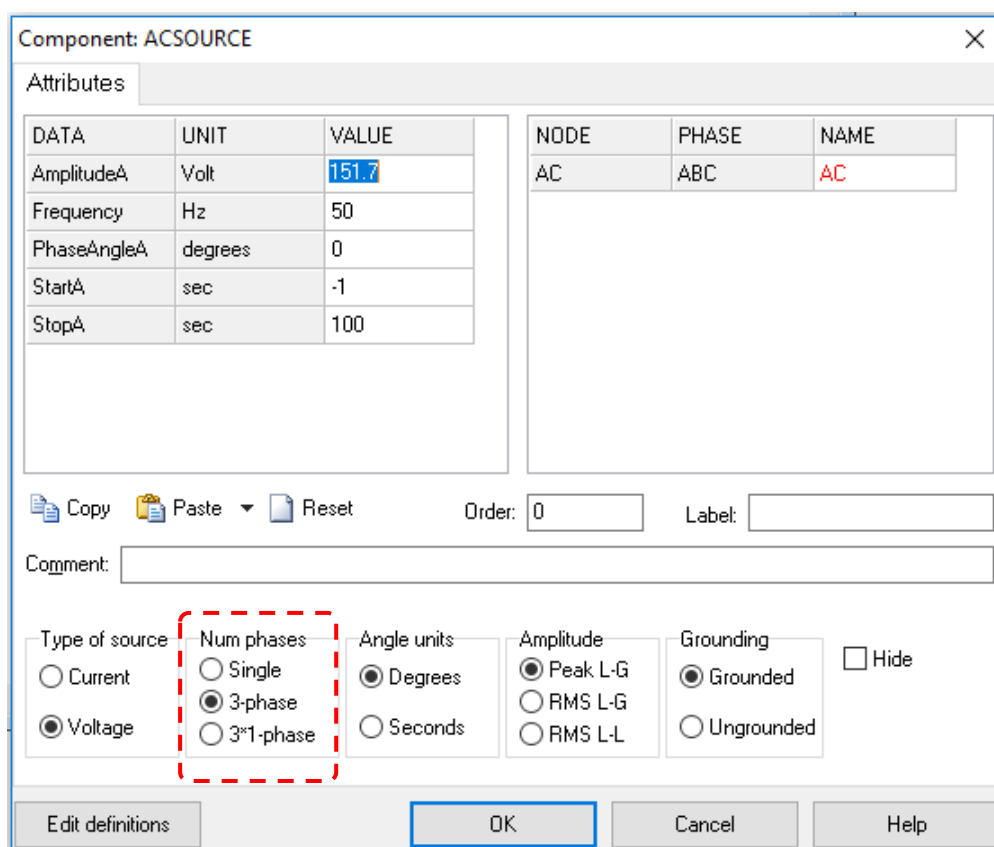
Obr. 40 Schéma pro přenos energie pro nabíjení akumulátorů [5], [6], [7], [26], [28], [29],

Schéma, které je znázorněno na Obr. 40 slouží pro přenos energie ze střídavé napájecí sítě přes usměrňovač až k následnému nabíjení akumulátoru.

Simulovaný model pro tento přenos se skládá ze střídavého 3 – fázového zdroje napětí, kde nastavená hodnota maximálního napětí pro jednotlivé fáze je vypočtena dle rovnice (9), 6 – ti pulzního usměrňovače a řízeného zvyšovacího DC/DC měniče. Pro vyhlazení stejnosměrného průběhu po usměrnění a na výstupní straně DC/DC měniče je zapojen v obvodu *LC* filtr a kapacita *C*. Jejich hodnoty jsou zaneseny do Tabulka 9.

Tabulka 9 Informace o použitých veličinách pro simulaci

Informace o zdroji a filtrech v simulaci					
3 fázový střídavý zdroj		LC filtr DC/DC vstup		LC filtr DC/DC výstup	
U_m	151,7 V	<i>L1</i>	20 mH	<i>C2</i>	500 μ F
		<i>C1</i>	750 μ F		



Obr. 41 Nastavení hodnoty napětí střídavého zdroje v ATP Draw – ilustrační obrázek

Obr. 41 znázorňuje výřez okna z programu ATP Draw, kde se nastavuje potřebné vstupní střídavé napětí zdroje. Jak již bylo okrajově zmíněno v popisu měření, tak vstupní napětí do

měníče není 3 – fázového charakteru, ale bylo rozděleno na 3 samostatné jednofázové napětí, které byly regulovány odbočkami transformátoru. Toto rozdělení fází se nachází v dolní části okna v položce „Num phase“, kde je na výběr zapojení zdroje „3*1-phase“. Toto rozdělení fází je vhodné pro nesymetrický zdroj, proto jsem použil raději variantu „3-phase“, ve které je napětí v každé fázi stejné. Je to z důvodu, že efektivní hodnota napětí pro každou fázi je stejná, tudíž i maximální vypočtená hodnota napětí bude stejná pro každou fázi. [19], [21]

$$U_d = \frac{6}{2\pi} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin \omega t \, d\omega t = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot U = 1.35 \cdot U = 2.43 \cdot U_f \quad (\text{V}) \quad (13)$$

kde:

U – efektivní hodnota napětí napájecí sítě

U_f – efektivní hodnota sdruženého napětí napájecí sítě

Výsledné napětí na výstupu po usměrnění je dáno dle vzorce (13), kdy jeho hodnota po dosazení do rovnice činí:

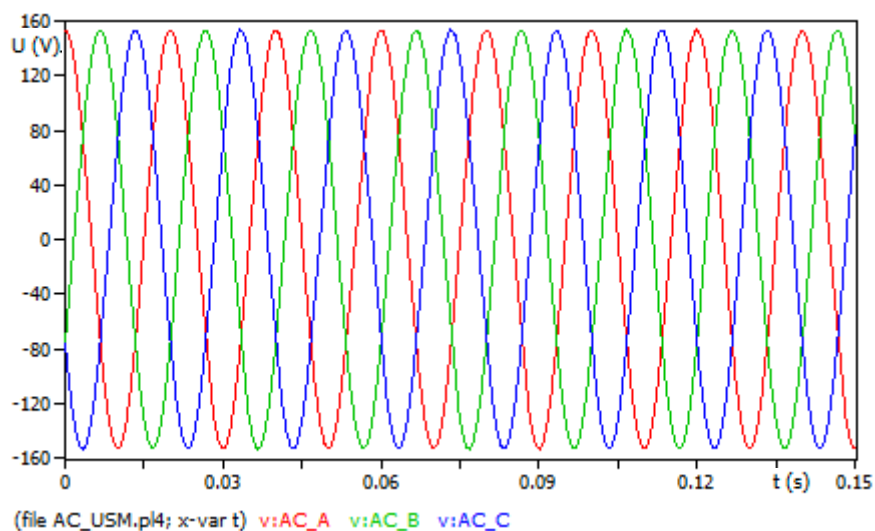
$$U_d = 2,43 \cdot U_f = 2,43 \cdot 107,3 = 260,7\text{V} \quad (14)$$

V zapojení je toto napětí možno změřit na kapacitě $C1$.

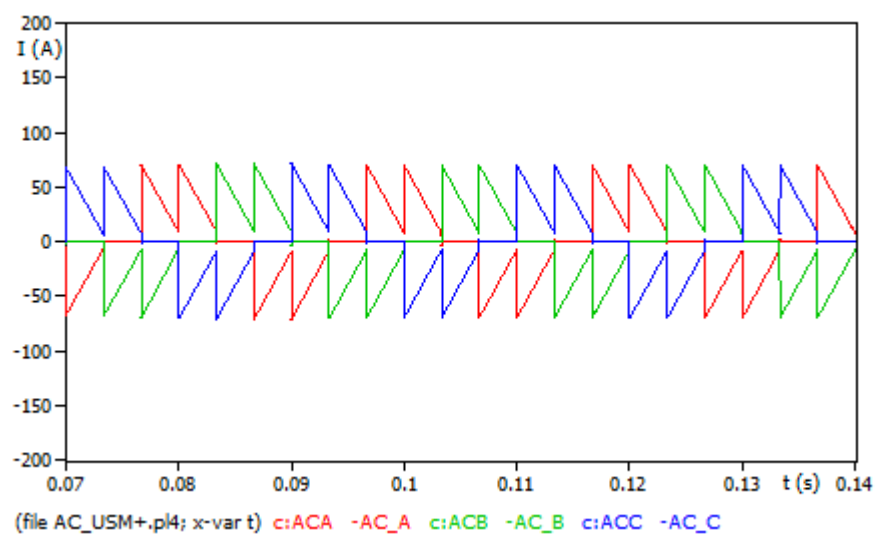
Simulované průběhy napětí, které jsou zobrazeny na Obr. 42, jsou napětí na vstupním střídavém zdroji, kde jednotlivé fázové hodnoty jsou zaneseny do jednoho grafu a tvoří tak 3 – fázový průběh napětí s maximální hodnotou napětí $U = 151,7 \text{ V}$ v každé fázi.

Simulované průběhy proudu, které jsou zobrazeny na Obr. 43, je proud na vstupním střídavém zdroji, kde jednotlivé fázové hodnoty jsou zaneseny do jednoho grafu a tvoří tak 3 – fázový průběh s RMS hodnotou 1. harmonické $I_{\text{RMS}} = 30 \text{ A}$ v každé fázi.

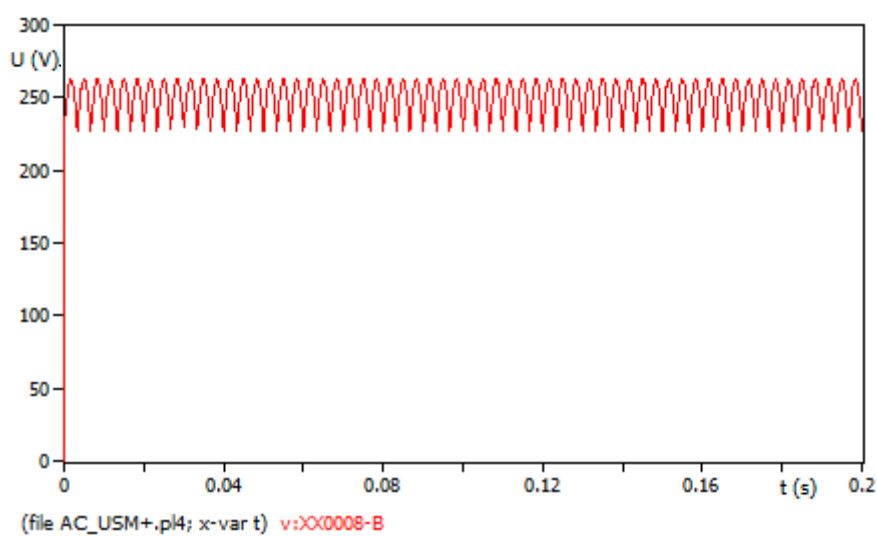
Výstupní hodnoty napětí po usměrnění jsou znázorněny na Obr. 44. Červený průběh je reprezentován usměrněným napětím pomocí 6 – ti pulzního usměrňovače. Toto napětí je možno změřit v schéma na kapacitě $C1$. Hodnoty LC filtru nebyly určeny výpočtem, ale jsou pouze informativní, aby byl průběh výstupního napětí z usměrňovače vyhlazený.



Obr. 42 Jednotlivé průběhy napětí na střídavém zdroji – simulovaný průběh

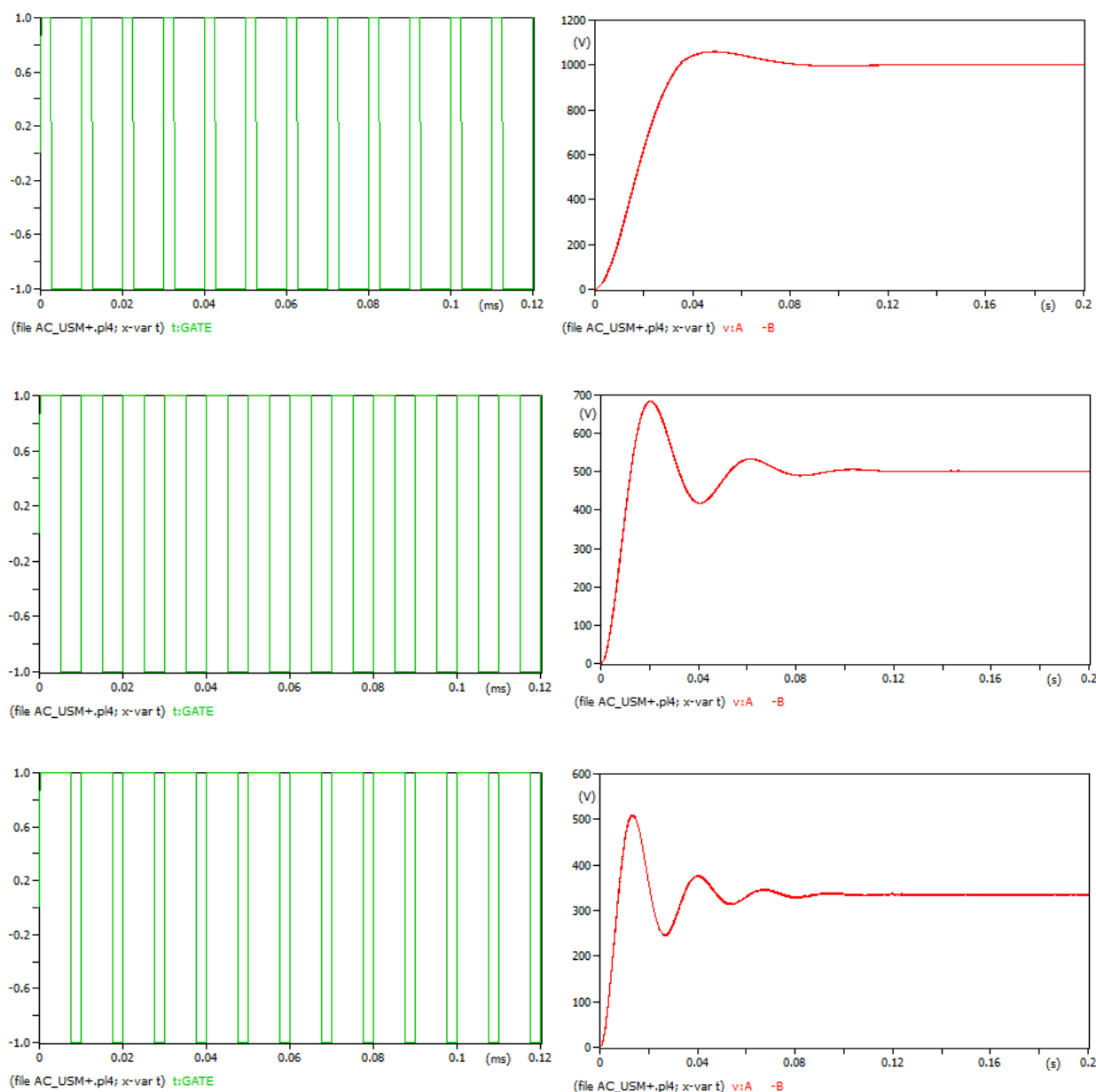


Obr. 43 Jednotlivé průběhy proudu na střídavém zdroji – simulovaný průběh



Obr. 44 Průběh napětí na výstupu z usměrňovače – simulovaný průběh

Algoritmus spočívá ve výpočtu napětí a proudu na výstupu z DC/DC měniče. Regulace výstupního napětí je založena na nastavení konstanty „CONST“ PWM modulátoru a tím dochází ke změně střídý. Frekvence PWM je konstantní a určuje, jak rychle bude docházet ke změně stavu v tomto případě je frekvence pilového zdroje $f = 10 \text{ kHz}$. Střída určuje poměr mezi stavem log. 1 a celou periodou. Pro ukázkou zde uvádím průběhy, jak se změnilo napětí na výstupu při změně střídý na 25%, 50% a 75%. Jednotlivé hodnoty časů jsem pro porovnání zanesl do Tabulka 10.



Obr. 45 Výstupní napětí z měniče při změně střídý 25%, 50% a 75% – simulovaný průběh

Výpočet střídý je založen na poměru časů, ve kterých je obdélníkový signál v jednotlivých úrovních. Pokud je střída udána v procentech, myslí se tím obvykle doba trvání úrovně t_{on} „zapnuto“ vůči celkové periodě signálu T .

$$D = \left(\frac{t_{on}}{T} \right) \cdot 100 \quad (\%) \quad (15)$$

kde:

D – střída

t_{on} – čas v aktivním stavu

T – perioda signálu

Tabulka 10 Parametry pro výpočet střídý

Informace pro výpočet střídý				
Nastavení konstanty	t_{on}	T	Střída D	Výstupní napětí
(-)	(s)	(s)	(%)	(V)
0,25	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	25	1002,1
0,5	$5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	50	501,7
0,75	$7,5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	75	334,8

Výpočet proudu na výstupních svorkách „A“ a „B“ z DC/DC měniče je založen na výpočtu rezistoru zátěže R_z , který je připojen paralelně k výstupním svorkám. Výpočet je proveden dle rovnice (16), která je následně implementovaná do simulace.

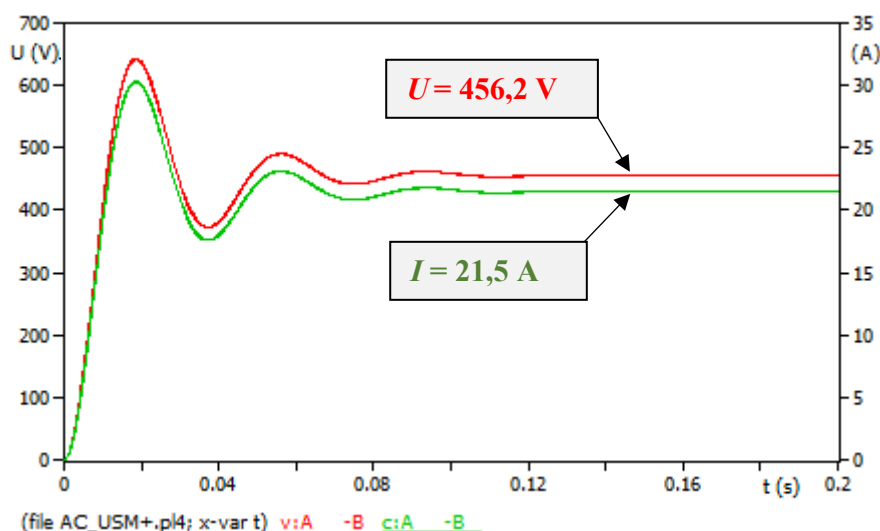
$$R_z = \frac{U}{I} = \frac{455,4}{21,5} = 21,2 \, \Omega \quad (16)$$

Hodnoty potřebné pro výpočet rezistoru jsou uvedené v Tabulka 11

Tabulka 11 Veličiny pro výpočet rezistoru zátěže

Nastavené hodnoty		
Regulace I pomocí R_z		
Napětí na výstupu měniče (změřená hodnota)	Proud na výstupu měniče (změřená hodnota)	Rezistor zátěže R_z
455,4 V	21,5 A	21,2 Ω

Výstupní hodnoty napětí a proudu na svorkách z měniče jsou znázorněny na Obr. 46. Hodnoty napětí (červený průběh) a proudu (zelený průběh) lze přesně nastavit pomocí konstanty „CONST“, tak i pomocí paralelního rezistoru (zátěže) R_z na výstupních svorkách z měniče. Nasimulované hodnoty lze porovnat s naměřenými hodnotami, které jsou uvedeny v Tabulka 11. Porovnáním těchto hodnot lze konstatovat, že nasimulované hodnoty na výstupu jsou totožné s hodnotami, které byly naměřeny měřicím přístrojem FLUKE. Díky tomu je možno nastavit přesné hodnoty veličin na výstupní straně z měniče.



Obr. 46 Průběh napětí a proudu na výstupních svorkách z měniče – simulovaný průběh [26]

9.3 Chyby měřicího přístroje napětí

Pro oba způsoby měření napětí byl použitý digitální multimetr se 4 místným dispejem zn. FLUKE, typ 175, který má dle katalogového listu přesnost měření pro DC napětí $\pm (0,15\%$ rozsahu + 2 digity), bude chyba následující:

Rozsah přístroje byl nastaven automaticky,

Změřené napětí $U = 455,4$ V,

$$\Delta u = \pm(0,15\% \cdot \text{naměřené hodnoty} + 2 \cdot \text{digity}) = (0,0015 \cdot 455,4 + 2 \cdot 0,001) = \pm 0,69\text{V} \quad (17)$$

$$\delta x = \frac{\Delta u}{x} \cdot 100 = \frac{0,69}{455,4} \cdot 100 = 0,15\% \quad (18)$$

Digitálním multimetrem zn. FLUKE je změřeno DC napětí:

$$U = (455,40 \pm 0,69) \text{ V s relativní chybou } 0,15 \%$$

9.4 Chyby měřicího přístroje proudu

Pro měření proudu byl použitý digitální klešťový ampérmetr se 4 místným displejem zn. FLUKE, typ 325 true – RMS, který má dle katalogového listu přesnost měření pro DC proud $\pm (2\% \text{ rozsahu} + 5 \text{ digitů})$, bude chyba následující:

Rozsah přístroje byl nastaven automaticky,

Změřený proud $I = 21,5 \text{ A}$,

$$\Delta i = \pm(2\% \cdot \text{naměřené hodnoty} + 5 \cdot \text{digitů}) = (0,02 \cdot 21,5 + 5 \cdot 0,001) = \pm 0,44 \text{ A} \quad (19)$$

$$\delta x = \frac{\Delta i}{x} \cdot 100 = \frac{0,44}{21,5} \cdot 100 = 2,05\% \quad (20)$$

Digitálním klešťovým ampérmetrem zn. FLUKE je změřen DC proud:

$$I = (21,50 \pm 0,44) \text{ A s relativní chybou } 2,05\%$$

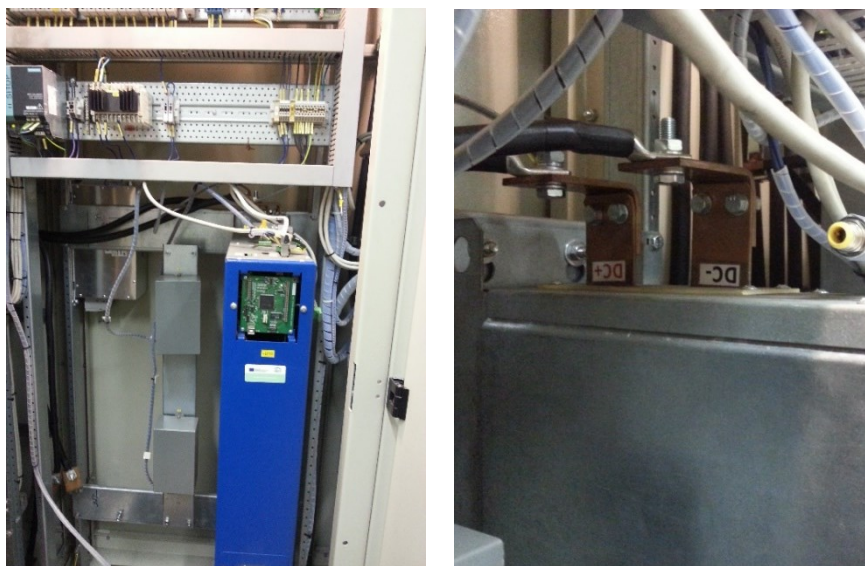
9.5 Zhodnocení simulace

V této kapitole je popsán model a simulace v programu ATP, dle skutečných naměřených hodnot z TCO. Simulace má za úkol porovnat vytvořený model a naměřené data a zjistit správnost modelu dle implementovaných dat. Daný model je vytvořen pro simulaci toku energie z distribuční sítě přes výkonový měnič až k nabíjení akumulátorů. Úkolem je stanovit výstupní hodnoty napětí a proudu, které jsou potřebné pro nabíjení akumulátorů. Tyto elektrické parametry můžeme jednoduše nastavit na modelu danými prvky. Pro regulaci výstupní hodnoty napětí je použita změna konstanty CONST, kterou najdeme ve schéma zapojení v řídicím obvodu DC/DC měniče. Nastavením hodnoty konstanty se začne měnit i střída a tím dochází k regulaci výstupního napětí na požadovanou hodnotu. Regulace proudu je založena na výpočtu paralelního výstupního rezistoru R_z . Hodnota daného rezistoru je vypočtena dle Ohmova zákona a jeho hodnota nám určuje potřebný výstupní proud. Díky přesnému nastavení výstupních parametrů, lze dosáhnout přesných naměřených hodnot.

10 Analýza dat při dodávce elektrické energie do DS

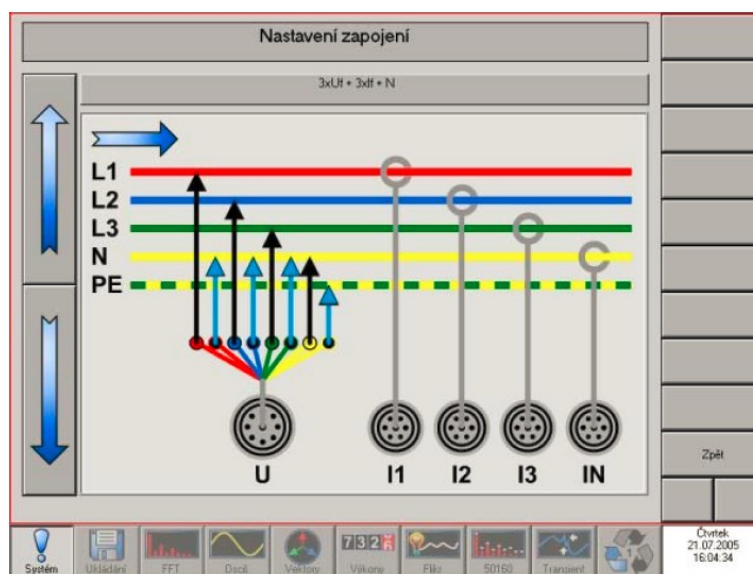
10.1 Popis průběhu měření

Měření probíhalo při zapnutém reverzibilním měniči, kde přívodem do měniče bylo stejnosměrné napětí z hlavního akumulátorového bloku (1. sekce). Vstupní stejnosměrné napětí bylo následně v měniči za pomoci IGBT tranzistorů rozstrídáno pro napájení distribuční sítě.

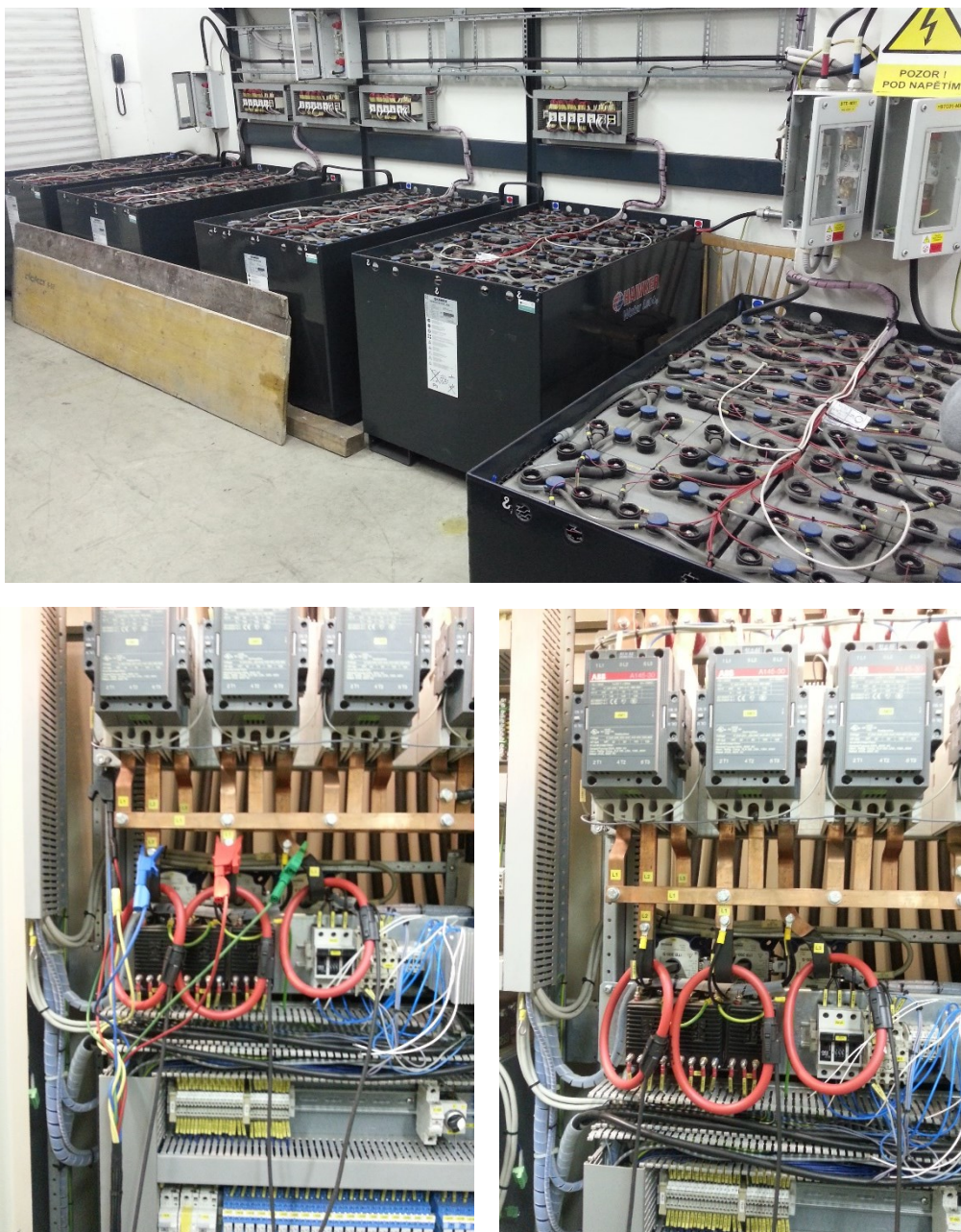


Obr. 47 Vodou chlazený výkonový reverzibilní měnič U10 a jeho detail vnitřního zapojení

Pro daný typ měření bylo zvoleno zapojení typu $3 \times U_f + 3 \times I_f + N$, které je zobrazeno na Obr. 32



Obr. 48 Způsob připojení analyzátoru k měniči v zapojení do DS



Obr. 49 Akumulátorovna a detailní zapojení napěťové a flexibilní proudové sondy v rozváděči

Průběhy napětí a proudů na výstupu z měniče, přesněji v rozváděči 90BUA, byly měřeny pomocí analyzátoru BK – ELCOM model ENA500.12. Hodnoty proudu byly snímány flexibilní sondou (Rogowského cívka – AmpFLEX), která byla zapojena na přípojnici příslušného fázového vodiče (na výstupu z TR). Napětí bylo změřeno krokosvorkami, které byly zapojeny na stejných sběrnicích jako proudové sondy, jak je možno vidět na Obr. 49 (opět na výstupu z TR).

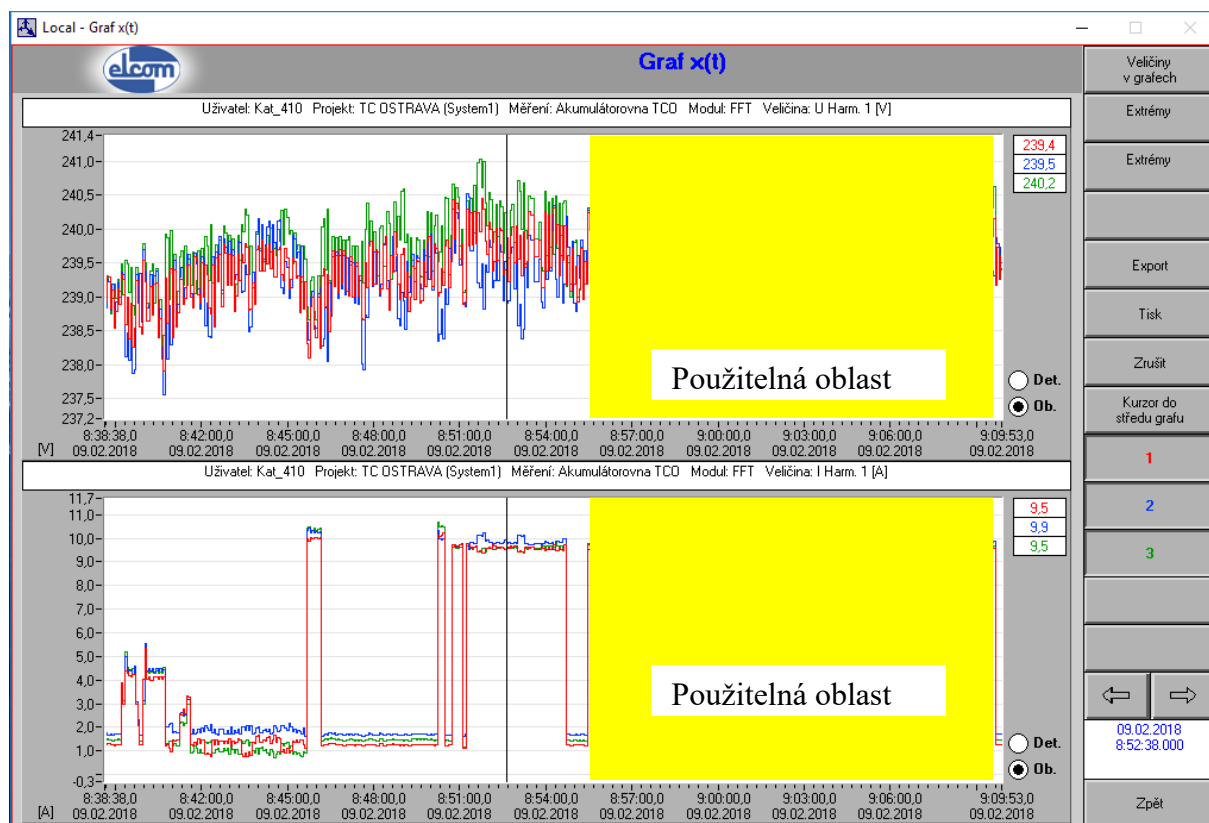
Hodnota napětí a proudu na vstupní straně měniče (DC strana) byla odečtena pomocí digitálního voltmetru a digitálního ampérmetru, oba značky FLUKE, ale také byly hodnoty

odečítány z měřicí ústředny, kde se jednotlivé hodnoty zobrazovaly. Vzorkovací frekvence analyzátoru BK – ELCOM modelu ENA500.12 byla 9600 Hz.

Tabulka 12 Informace o měřených veličinách pro jednotlivé fáze v reálném čase

Přehled měřených veličin jednotlivých fází v čase	
Celkový naměřený čas	
[h:min:s]	
8:38:38	9:09:53
Oblast použitelných hodnot	
[h:min:s]	
8:55:24	9:09:43

V Tabulka 12 uvádím jednotlivé reálné časy z měření na výkonovém měniči, které proběhlo ze dne 9. 2. 2018, které jsou zaneseny do softwaru BK – Report. Pomocí těchto údajů lze ze softwaru vyčíst jednotlivé průběhy pro danou fázi měření a vynést tak příslušné grafy.



Obr. 50 Průběhy napětí a proudů jednotlivých fází na výstupu transformátoru

Z průběhu, na kterém jsou barevně vyznačeny jednotlivé časové úseky jednotlivých fází, které jsou zaznamenány i v Tabulka 12, je možno také vyčíst, kolísání hodnot napětí a proudu, tento jev je způsoben nastavováním hodnot v řídicím systému TCO, kdy bylo potřeba správně nastavit hodnoty na výstupu z akumulátoru do měniče.

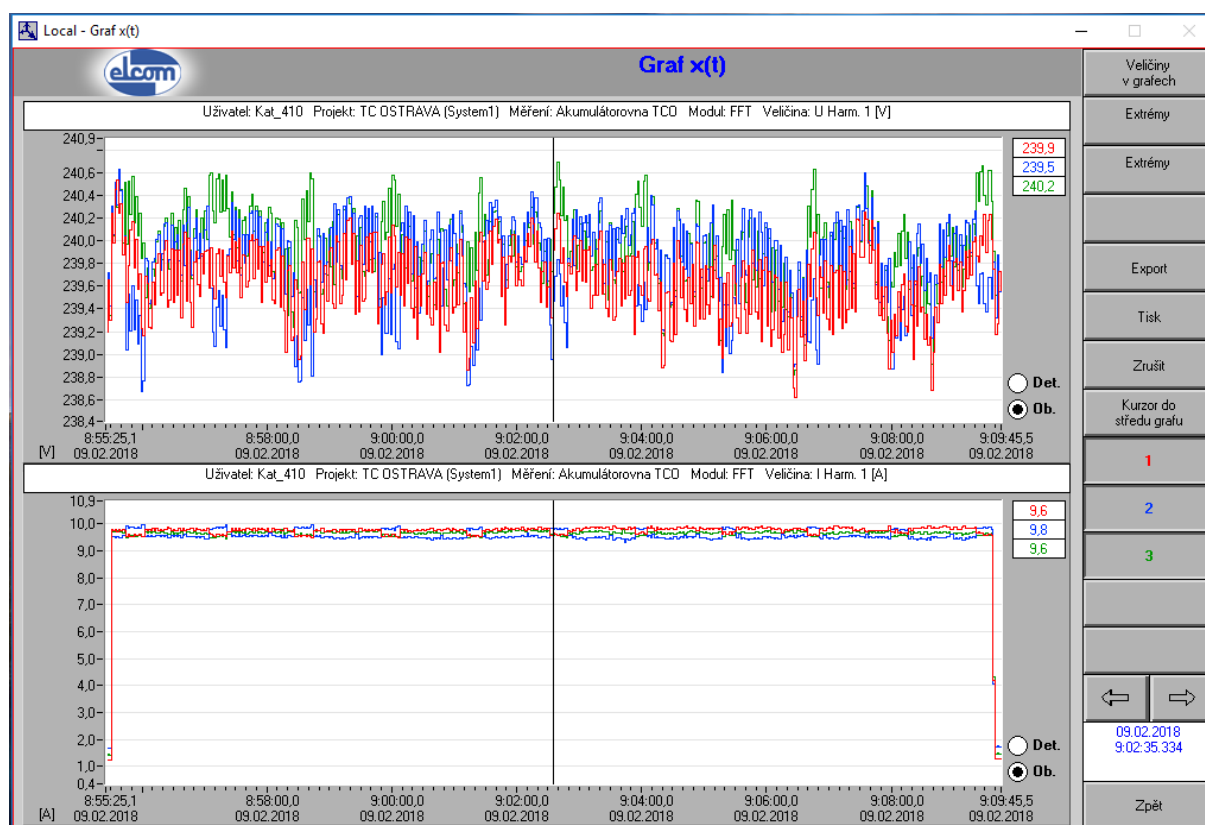
Tabulka 13 Část informací o měřených veličinách získané z ústředny TCO i z digitálních měřicích přístrojů

Datum Čas	Data z ústředny TCO			Data z dig. měřicích přístrojů FLUKE		
	Napětí U_{DC}	Proud I_{DC}	Výkon P_{DC}	Napětí U_{DC}	Proud I_{DC}	Výkon P_{DC}
(h)	(V)	(A)	(W)	(V)	(A)	(W)
08:59:00	401	20,8	8341,5			
08:59:05	399	20,9	8092,9	398	20,3	8079,4
08:59:10	398	20,5	8141,9			
08:59:15	398	20,2	8054,8			
08:59:20	399	20,3	8099,6			
08:59:25	400	20,7	8281,6			
08:59:30	400	20,3	8123,8	399	20,4	8139,6
08:59:35	399	20,3	8108,7			
08:59:40	400	20,9	8341,6			
08:59:45	398	20,1	7987,1			
08:59:50	399	20,3	8115,6			
08:59:55	398	20,1	8004,0			
09:00:00	400	20,2	8080,3	400	20,1	8040
09:00:05	401	20,6	8263,6			
09:00:10	401	20,8	8359,4			
09:00:15	400	20,3	8100,4			
09:00:20	400	20,8	8301,1			
09:00:25	401	20,8	8359,5			
09:00:30	401	20,1	8060,7	401	20,2	8100,2
09:00:35	398	20,7	8239,2			
09:00:40	400	20,9	8362,4			
09:00:45	399	20,6	8234,3			
09:00:50	398	20,9	8321,6			
09:00:55	400	20,8	8134,4	399	20,4	8139,6
09:01:00	398	20,9	8336,6			
09:01:05	401	20,3	8132,6			
09:01:10	401	20,2	8113,5			
09:01:15	400	20,6	8230,8			
09:01:20	398	20,8	8272,4			
09:01:25	399	20,8	8093,9	398	20,3	8079,4
09:01:30	398	20,6	8188,1			

V Tabulka 13 jsou uvedeny částečné data, která byla pořízena z ústředny TCO, kde dané vzorky byly snímány v rozsahu 5 s a dále naměřená data přímo z měřicích přístrojů FLUKE, která byla náhodně snímána v délce 1,5 minut s frekvencí 25 až 30 s.

10.2 Simulace na počítačovém modelu

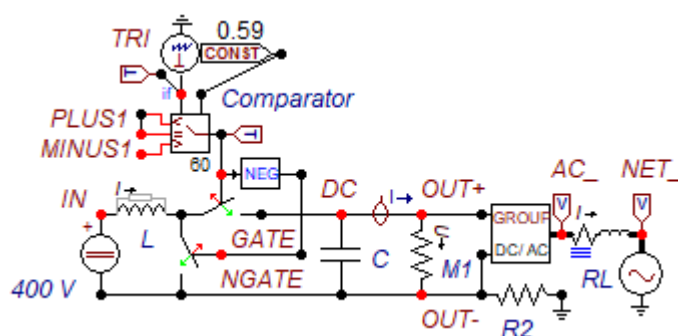
Pro nastavení hodnoty DC zdroje pro simulaci, je potřeba stanovit maximální hodnotu napětí, která pak následně bude znázorňovat napětí zdroje. Tato hodnota byla jednoduše stanovena jako referenční hodnota napětí, kterou lze z olovených akumulátorů získat. Referenční hodnota napětí akumulátorů je $U = 400 \text{ V}$ a hodnota proudu z akumulátorů, která byla nastavena pomocí softwaru v řídicím centru TCO je $I = 20 \text{ A}$



Obr. 51 Průběhy napětí a proudů v reálném čase na jednotlivých fázích na výstupu z měniče

Tabulka 14 Informace o měřených veličinách na vstupu a výstupu měniče

Naměřené hodnoty			
FLUKE		BK - ELCOM	
Vstup do měniče (DC strana)		Výstup z měniče (AC strana)	
U	400 V	U_f	242 V
I	20 A	I_f	10 A



Obr. 52 Schéma pro přenos energie pro nabíjení akumulátorů [5], [6], [11], [12], [15], [28], [29]

Počítačový model byl vytvořen z aktuálního stavu měření, kdy bylo třeba ověřit a porovnat reálné naměřené hodnoty s počítačovým modelem, tak jako v předchozím případě.

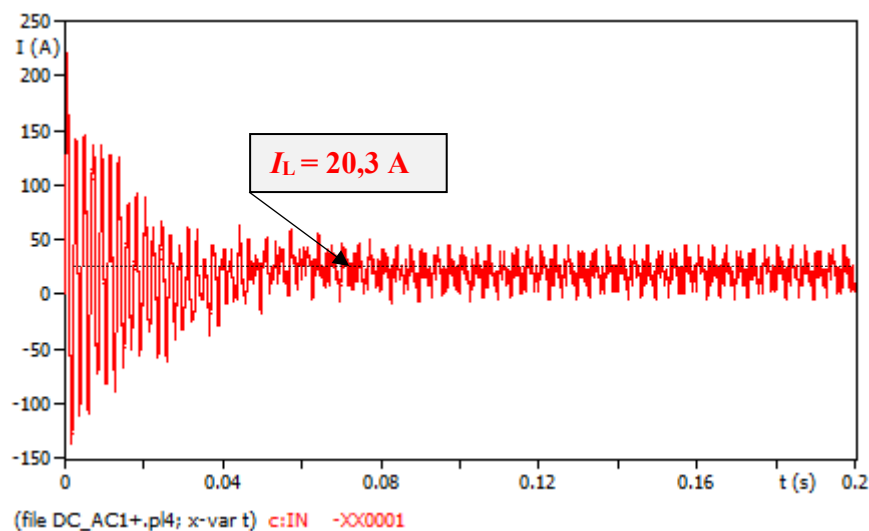
Schéma, které je znázorněno na Obr. 52 slouží pro přenos energie z akumulátorů přes reverzibilní měnič (střídač) až do distribuční sítě.

Simulovaný model pro tento přenos se skládá ze stejnosměrného zdroje napětí, řízeného zvyšovacího DC/DC měniče, řízeného DC/AC střídače, který je znázorněn v blokovém zapojení a 3 – fázového střídavého zdroje, který představuje distribuční síť. Pro vyhlazení stejnosměrného průběhu na výstupní straně DC/DC měniče je zapojen v obvodu L filtr a na výstupu z DC/DC měniče kapacita C . Jejich hodnoty jsou zaneseny do Tabulka 15 .

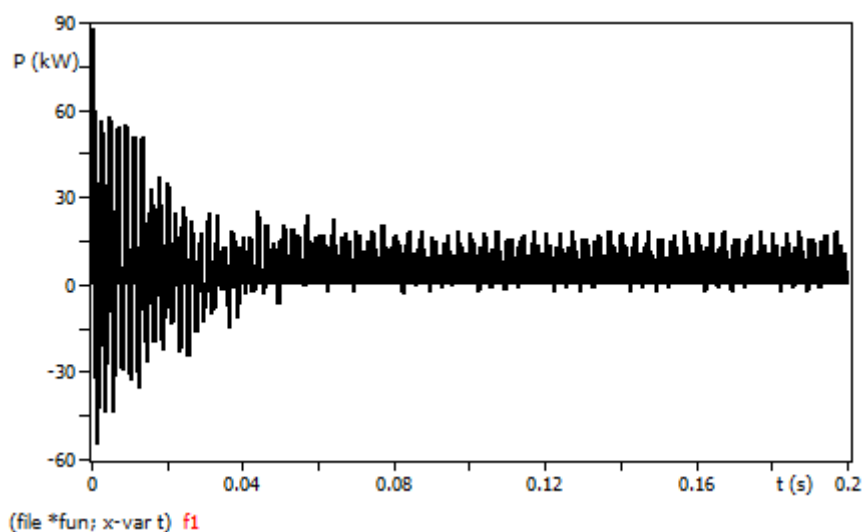
Tabulka 15 Informace o použitých veličinách pro simulaci

Informace o zdroji a filtrech v simulaci							
DC zdroj		L filtr DC/DC vstup		C filtr DC/DC výstup		3 - fázový střídavý zdroj	
U_{DC}	400 V	L	0,7 mH	C	500 μ F	U_m	342,2 V

Spuštěním simulace, jsou průběhy vstupních parametrů (proudu I_L a výkonu P_{DC}), zobrazeny na Obr. 53 a Obr. 54, tak i průběhy výstupních parametrů (napětí $U_{f_A,B,C}$, proudu $I_{f_A,B,C}$ a výkonu P_{AC}), zde jsou parametry zobrazeny na Obr. 56, Obr. 57 a Obr. 58



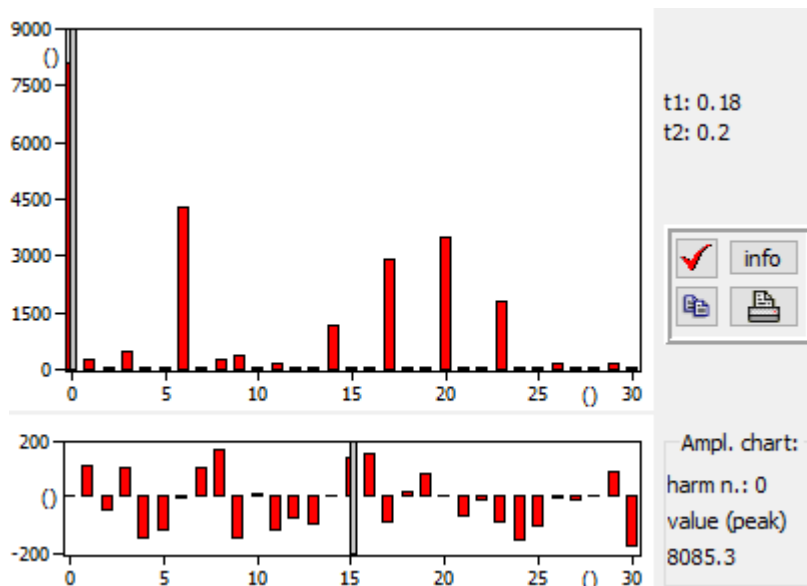
Obr. 53 Průběh proudu I_L na indukčnosti L – simulovaný průběh



Obr. 54 Průběh stejnosměrného výkonu P_{DC} , který je dodáván z akumulátoru – simulovaný průběh

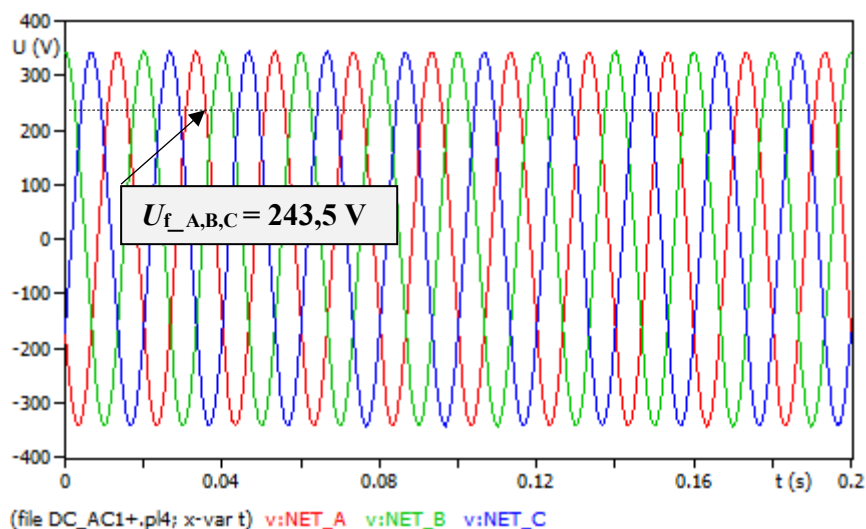
Pro vykreslení průběhu stejnosměrného výkonu P_{DC} , který je dodáván z akumulátoru je možné zvolit funkci „formula string“, s touto funkcí můžeme do programu vložit rovnici a následně vykreslit jakýkoliv průběh, tak jak je vidět na Obr. 21. Pro vykreslení výkonu, který je dodáván z akumulátoru, byl zvolen řetězec ve tvaru „400*v10“.

Velikost vstupního stejnosměrného výkonu P_{DC} , lze vyjádřit z průběhu na Obr. 54, nebo také pomocí Fourierovy transformace. Tato transformace nám určuje jak kvalitu stejnosměrného výkonu dle harmonických hodnot, tak i jeho velikost. Tady je zřejmé, že DC zdroj (akumulátor) je schopen dodat výkon 8085,3 W (vstupní výkon do DC/DC měniče).

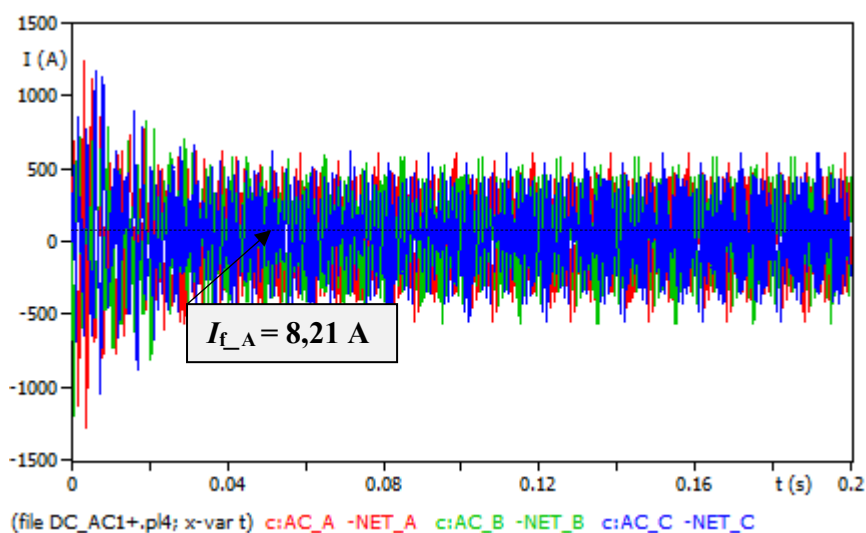


Obr. 55 Hodnota výstupního výkonu P_{DC} z akumulátoru pomocí Fourierovy transformace – simulovaný průběh

Pro získání výkonu, který je dodáván do distribuční sítě bylo nutno správně vyhodnotit průběhy napětí. V tomto případě se jednalo o výstupní 3-fázové napětí, které vystupuje z DC/AC měniče (v modelu znázorněno jako AC_) a 3-fázové napětí zdroje (v modelu znázorněno jako NET_). V mém případě jsem zvolil jako správné napětí 3-fázového zdroje (NET_), je to z důvodu, že tento zdroj představuje DS viz Obr. 56.



Obr. 56 Hodnota výstupního napětí na 3-fázovém zdroji (NET_) na jednotlivých fázích – simulovaný průběh



Obr. 57 Hodnota výstupního proudu z DC/AC střídače jednotlivých fází – simulovaný průběh

Z daných průběhů lze stanovit hodnoty napětí a proudu.

$$U_{f_A} = 243,5 \text{ V} \quad U_{f_B} = 243,5 \text{ V} \quad U_{f_C} = 243,5 \text{ V}$$

$$I_{f_A} = 8,21 \text{ A} \quad I_{f_B} = 8,25 \text{ A} \quad I_{f_C} = 8,35 \text{ A}$$

Výkon na jednotlivých fázích je stanoven jako součin okamžitých hodnot napětí zdroje (NET_) a výstupního proudu z DC/AC střídače. Hodnota dodávaného výkonu v jednotlivých fázích je určena výpočtem, tak i z Fourierovy transformace jako 0. harmonická viz Obr. 59

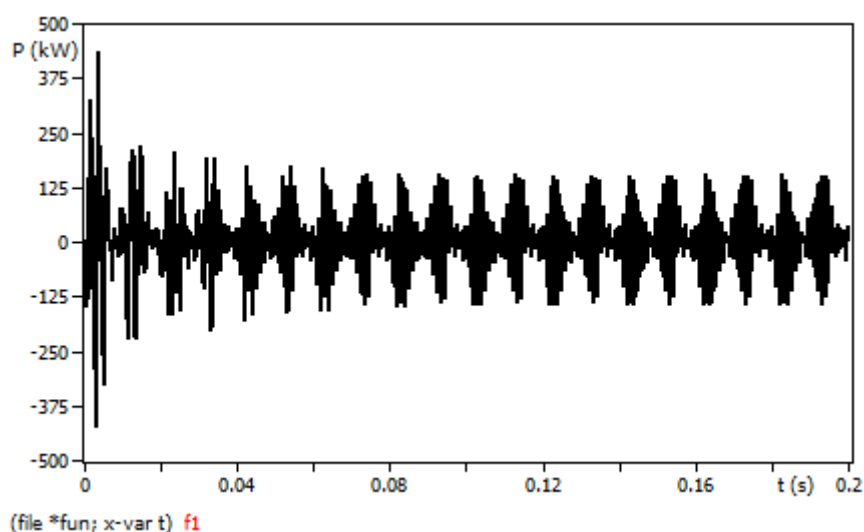
$$P_A = U_{f_A} \cdot I_{f_A} = 243,5 \cdot 8,21 = 1997,8 \text{ W} \quad (21)$$

$$P_B = U_{f_B} \cdot I_{f_B} = 243,5 \cdot 8,25 = 2008,3 \text{ W} \quad (22)$$

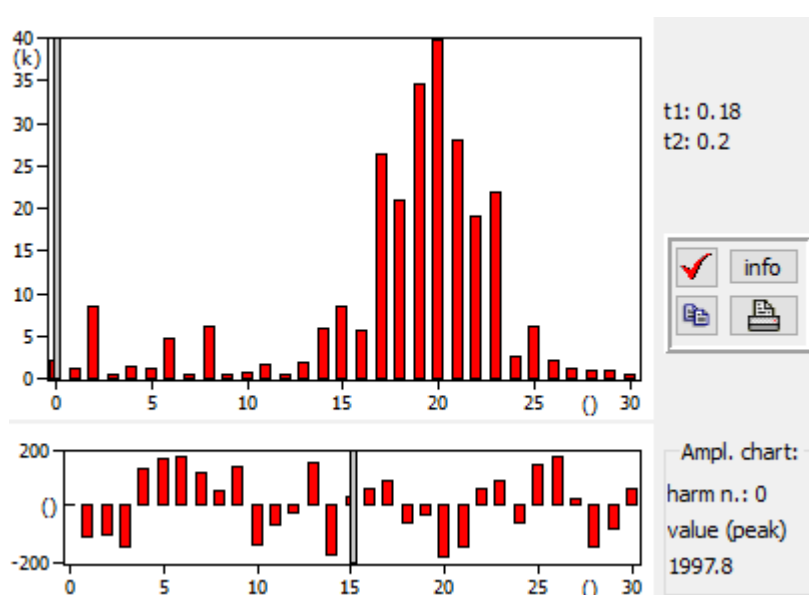
$$P_C = U_{f_C} \cdot I_{f_C} = 243,5 \cdot 8,35 = 2032,9 \text{ W} \quad (23)$$

Celkový výkon na výstupní straně, který je dodáván do distribuční sítě je určen, jako součet výkonů jednotlivých fází svého 3-fázového zdroje. Výkon P_{AC} je znázorněn rovnicí (24).

$$P_{AC} = P_A + P_B + P_C = 1997,8 + 2008,3 + 2032,9 = 6039 \text{ W} \quad (24)$$



Obr. 58 Průběh dodávaného výkonu P_{AC} na 3-fázovém zdroji ve fázi A – simulovaný průběh



Obr. 59 Výsledek dodávaného výkonu P_{AC} na 3-fázovém zdroji ve fázi A dle Fourierovy transformace – simulovaný průběh

Aby bylo možné vycházet ze stejné situace, jak tomu bylo při měření v TCO (tj. dodávka elektrické energie z akumulátorů do DS) musel jsem nastavit hodnoty zdrojů na vstupu, tak i na výstupu. Správného ověření, lze dosáhnout tím, že si určíme hodnoty výkonu na vstupu (akumulátoru), tak i hodnotu výkonu na výstupu (distribuční síť). Při správném určení musí být hodnota výkonu na začátku vyšší, než na konci a tím dochází k toku energie právě z akumulátoru do DS. Abych zjistil, s jakou účinností dané zapojení pracuje, musel jsem výpočtem určit i ztráty, které vznikají na daném měniči. Tyto ztráty se určily z výkonu na začátku, tak i na konci modelu. Příslušné výkony jsou znázorněny do grafů a také znázorněny výpočtem viz rovnice (25)

$$\Delta P = P_{DC} - P_{AC} = 8085,3 - (1997,8 + 2008,3 + 2032,9) = 2046,7W \quad (25)$$

Jak už vyplývá z rovnice (19), tak ztráty na modelu nejsou nulové. Z celkových vypočtených ztrátách, které vznikají na měniči, jsou zahrnuty ztráty na jednotlivých zapojených prvcích, v tomto případě na rezistoru M1, tak i na výstupním RL prvku. Velikosti rezistoru M1 má hodnotu $R = 1 \text{ k}\Omega$, velikosti prvku RL má hodnotu $R = 0,01 \text{ }\Omega$, $L = 0,1 \text{ mH}$. Připojený rezistor R2 ve schéma, je připojen z důvodu, aby se uzavřel obvod DC/DC měniče a byl tento obvod stabilnější. Hodnota je $R2 = 1 \text{ M}\Omega$, ztráty na tomto prvku jsou zanedbatelné.

Rozdělení ztrát ΔP na měniči

$$\Delta P_{M1} = \frac{U^2}{R} = \frac{666,67^2}{1000} = 444,45 \text{ W} \quad (26)$$

Výpočet ztrát na RL prvku je proveden rozdílem výkonu na vstupu a výstupu RL prvku

$$\Delta P_{RL} = P_{AC_} - P_{NET_} = 7642,1 - 6039,8 = 1602,3W \quad (27)$$

Do *Tabulka 16* uvádím výtah hodnot mezi naměřenými veličinami na DC straně, které pomocí ústředny v TCO byly uchovány pro pozdější analýzu a naměřenými veličinami na AC straně pomocí analyzátoru BK ELCOM. Z příslušných hodnot jsou vypočteny výkony na daných měřených stranách a následně vypočteny ztráty, které vznikají na výkonovém měniči. Taktéž uvádím výtah ze simulace, která byla provedena v simulačním prostředí ATP DRAW. Rovněž

jsou vypočteny výkony na jednotlivých vstupech a nich dále vypočteny ztráty, které vznikají simulovaném modelu.

Tabulka 16 Srovnání hodnot mezi měřenými a simulovanými hodnotami

Naměřené údaje z DC strany - ústředna TCO			Naměřené údaje z AC strany - BK ELCOM									
Napětí U_{DC}	Proud I_{DC}	Výkon P_{DC}	Napětí L1, L2, L3			Proud L1, L2, L3			Výkon L1, L2, L3			Výkon P_{AC}
(V)	(A)	(W)	(V)			(A)			(W)			(W)
399	20,3	8099,7	240	240	242	9,5	9,7	9,4	2280	2328	2275	6882,8
401	20,1	8060,1	241	243	240	9,7	9,5	9,8	2338	2309	2352	6998,2
400	20,2	8080	242	242	241	9,4	9,6	9,2	2275	2323	2217	6815,2
Ztráty ΔP na výkonovém měniči												
(W)												
1216,9												
1061,9												
1264,8												

Simulované údaje z DC strany - ATP DRAW			Simulované údaje z AC strany - ATP DRAW									
Napětí U_{DC}	Proud I_{DC}	Výkon P_{DC}	Napětí L1, L2, L3			Proud L1, L2, L3			Výkon L1, L2, L3			Výkon P_{AC}
(V)	(A)	(W)	(V)			(A)			(W)			(W)
400	20,3	8120	244	244	244	8,2	8,25	8,34	1998	2008	2033	6039
Ztráty ΔP na simulovaném modelu												
(W)												
2081												

10.3 Chyby měřicího přístroje napětí

Pro oba způsoby měření napětí byl použitý digitální multimetr se 4 místným dispejem zn. FLUKE, typ 175, který má dle katalogového listu přesnost měření pro DC napětí $\pm (0,15\% \text{ rozsahu} + 2 \text{ digity})$, bude chyba následující:

Rozsah přístroje byl nastaven automaticky,

Změřené hodnoty napětí $U_1 = 398 \text{ V}$, $U_2 = 399 \text{ V}$, $U_3 = 400 \text{ V}$, $U_4 = 401 \text{ V}$, $U_5 = 399 \text{ V}$, $U_6 = 398 \text{ V}$

Aritmetický průměr hodnot: $\bar{U} = 399,17 \text{ V}$

$$\Delta u = \pm(0,15\% \cdot \text{naměřené hodnoty} + 2 \cdot \text{digit}) = (0,0015 \cdot 399,17 + 2 \cdot 0,001) = \pm 0,60 \text{ V} \quad (28)$$

$$\delta x = \frac{\Delta u}{\bar{x}} \cdot 100 = \frac{0,60}{399,17} \cdot 100 = 0,15\% \quad (29)$$

Digitálním multimetrem zn. FLUKE je změřeno DC napětí:

$U = (399,17 \pm 0,60) \text{ V}$ s relativní chybou 0,15 %

10.4 Chyby měřicího přístroje proudu

Pro měření proudu byl použitý digitální klešťový ampérmetr se 4 místným displejem zn. FLUKE, typ 325 true – RMS, který má dle katalogového listu přesnost měření pro DC proud $\pm (2\% \text{ rozsahu} + 5 \text{ digit})$, bude chyba následující:

Rozsah přístroje byl nastaven automaticky,

Změřené hodnoty proudů $I_1 = 20,3 \text{ A}$, $I_2 = 20,4 \text{ A}$, $I_3 = 20,1 \text{ A}$, $I_4 = 20,2 \text{ A}$, $I_5 = 20,4 \text{ A}$, $I_6 = 20,3 \text{ A}$

Aritmetický průměr hodnot: $\bar{I} = 20,28 \text{ A}$

$$\Delta i = \pm(2\% \cdot \text{naměřené hodnoty} + 5 \cdot \text{digitů}) = (0,02 \cdot 20,28 + 5 \cdot 0,001) = \pm 0,41 \text{ A} \quad (30)$$

$$\delta x = \frac{\Delta i}{\bar{x}} \cdot 100 = \frac{0,41}{20,28} \cdot 100 = 2,02\% \quad (31)$$

Digitálním klešťovým ampérmetrem zn. FLUKE je změřen DC proud:

$I = (20,28 \pm 0,41) \text{ A}$ s relativní chybou 2,02%

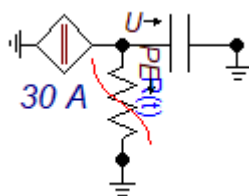
10.5 Zhodnocení simulace

V této kapitole je popsán model a simulace v simulačním programu ATP, dle skutečných naměřených hodnot z TCO. Simulace má za úkol porovnat vytvořený model a naměřené data a zjistit tak správnost modelu dle implementovaných dat. Daný model je vytvořen pro simulaci toku energie z hlavních akumulátorových bloků (1. sekce) přes výkonový měnič až do distribuční sítě. Úkolem této simulace je stanovit parametry na vstupní i výstupní straně (napětí, proudu a výkon), které jsou potřebné pro výpočet ztrát a k následnému porovnání s naměřenými hodnotami.

Porovnáním naměřených a simulovaných ztrát lze usoudit, že na modelu vznikají ztráty vyšší, to je způsobeno také i zapojením prvků a nesprávným odladěním modelu. Dále by bylo potřeba doplnit do střídače filtry, které by byly schopny odstranit matematické oscilace (spínací frekvence).

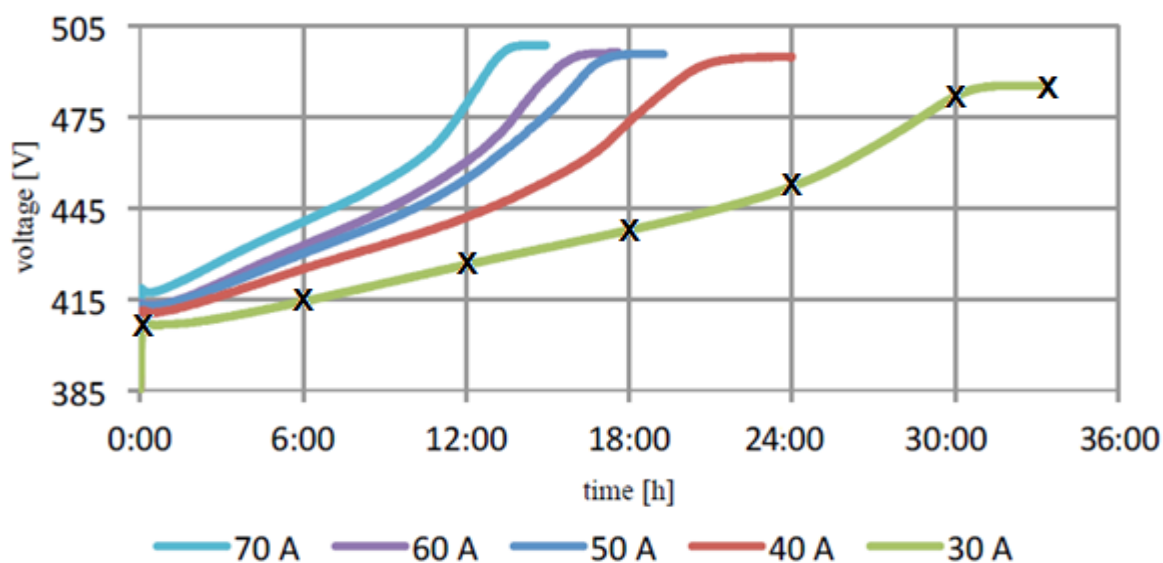
11 Ověření nabíjecí charakteristiky olověného akumulátoru

Další možností jak využít program v praxi je možnost stanovit a ověřit nabíjecí charakteristiky olověného akumulátoru. Budu vycházet ze zapojení, kdy se nabíjejí olověné akumulátory ze síťového napětí přes daný výkonový měnič, tudíž jsem zvolil pro tento účel analýzy hodnoty z daného měření, abych porovnal nabíjecí čas a výkon pro plné nabití akumulátoru, který je srovnaný se štítkovými hodnotami výrobce. Z důvodu, že nelze zakomponovat příslušné schéma do předchozí simulace, kvůli časové oblasti (čas simulace řádově statisíce sekund), musel jsem vytvořit nové schéma pro nabíjení akumulátorů. Vytvořené schéma v ATP – Draw, je reprezentováno proudovým zdrojem, nelineárním odporem a kapacitou. Kapacita zde slouží jen k vyřešení prvního kroku na nelineárním odporu. Schéma pro nabíjení akumulátorů je zobrazeno na Obr. 60.



Obr. 60 Schéma pro nabíjení akumulátorů

Pro správné nastavení hodnot nelineárního odporu je potřeba zjistit hodnoty rezistoru v určitém čase. K tomuto kroku byly využity data z měření nabíjecích charakteristik na olověné baterii, které byly již změřeny v minulých letech v Technologickém centru a které mi byly poskytnuty k porovnání simulace. Data ze softwaru LabVIEW byly vyneseny do grafu a představují tak reálné nabíjecí charakteristiky olověného akumulátoru umístěného v TCO. Tyto charakteristiky jsou znázorněny na Obr. 61.

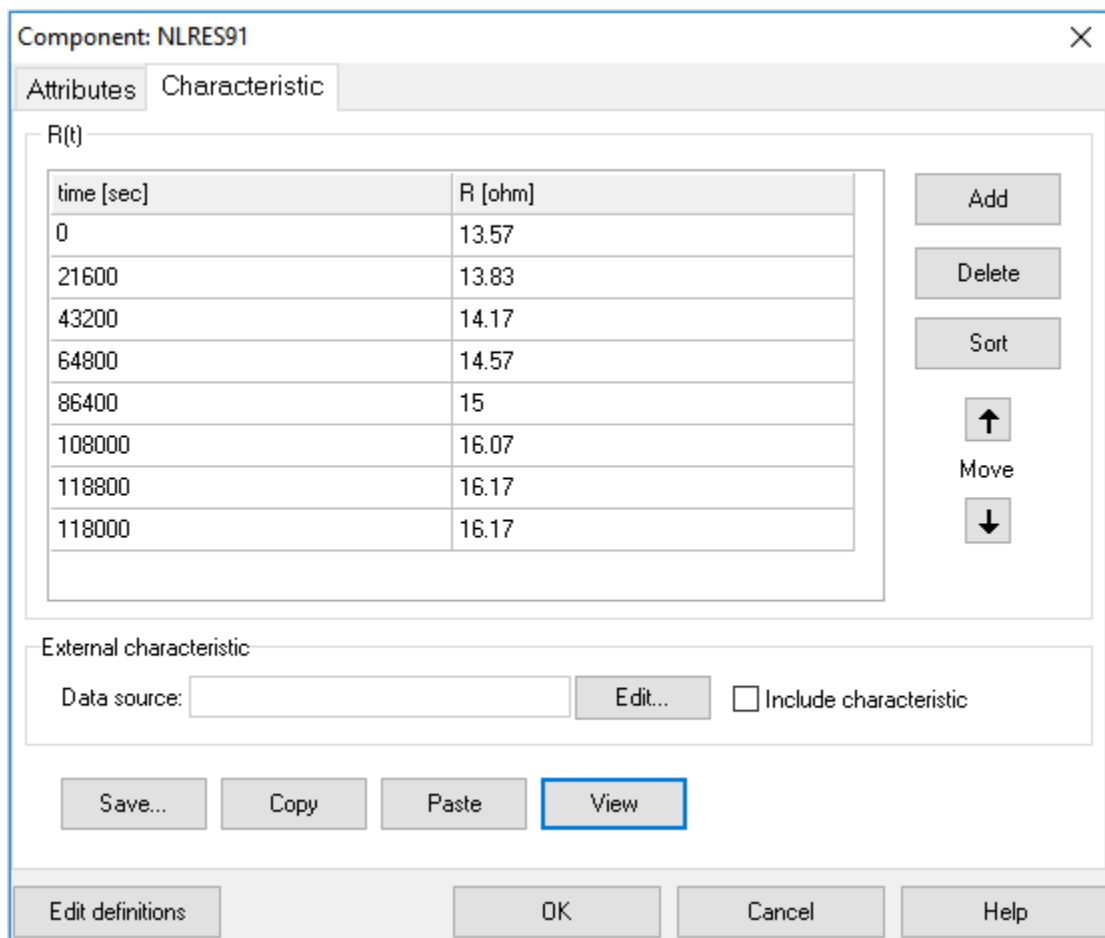


Obr. 61 Nabíjecí charakteristiky hlavních olověných baterií [22]

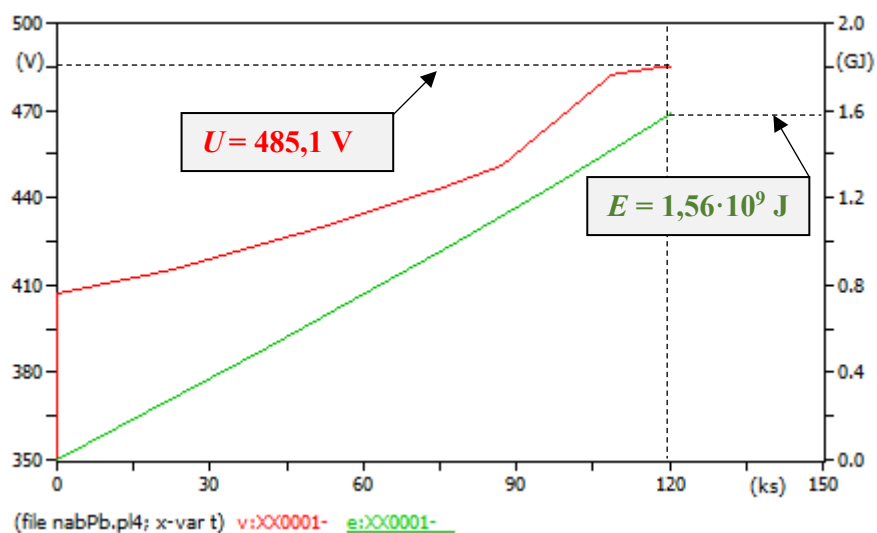
Z příslušných nabíjecích charakteristik budu posuzovat zelenou křivku, ta znázorňuje proud nabíjení $I = 30$ A, jelikož tento proud je nejbližší k výstupnímu proudu, který byl změřen klešťovým ampérmetrem FLUKE při měření na výkonovém měniči v TCO, kde hodnota proudu činila $I = 21,5$ A. Tudíž je zvolen ve schématu proudový zdroj s proudem $I = 30$ A. Hodnota pro nastavení nelineárního odporu je určena z nabíjecí charakteristiky, kde pro daný časový úsek je odečtena hodnota napětí. Odpor je pak následně vypočten podílem napětí odečtený z charakteristiky a požadovaného nabíjecího proudu, tak jak je znázorněno v Tabulka 17. Výsledky jsou vloženy do programu ATP – Draw.

Tabulka 17 Veličiny nastavení nelineárního rezistoru v ATP – Draw

Hodnoty odečtené z charakteristiky			
Čas (h)	Čas (s)	Napětí (V)	Hodnota rezistoru (Ω)
00:00	0	407	13,57
06:00	21600	415	13,83
12:00	43200	425	14,17
18:00	64800	437	14,57
24:00	86400	450	15,00
30:00	108000	482	16,07
33:00	118800	485	16,17
Vypočtená kapacita baterie $C = \text{nabíjecí proud} \cdot \text{celkový čas} = 30 \cdot 33 = 990 \text{ A} \cdot \text{h}$			



Obr. 62 Nastavení hodnoty nelineárního odporu v ATP Draw – ilustrační obrázek



Obr. 63 Nabíjecí charakteristika a energie Pb akumulátoru – simulovaný průběh

Tabulka 18 Informace mezi štítkovými a simulovanými hodnotami

Štítkové hodnoty		Simulované hodnoty	
Hawker (Pb akumulátor)			
Kapacita	C ₅ = 930 A·h	Kapacita	C = 990 A·h
Jmenovité napětí jedné sekce	400 V	Minimální napětí při začátku nabíjení	407 V
Maximální napětí jedné sekce	490 V	Miximální napětí při konci nabíjení	485,1 V
Maximální energie	455,7 kWh	Maximální energie	436,8 kWh

Porovnáním obou průběhů, jak reálné nabíjecí charakteristiky, tak charakteristiky, která byla nasimulovaná prostřednictvím modelu v softwaru ATP – Draw je možno vidět správné výsledné hodnoty. Odečtením hodnot z grafu při čase $t = 118800 \text{ s}$ (doba vypnutí nabíjení akumulátoru, kdy napětí dosáhlo konstantní hodnoty) dostaneme hodnotu napětí $U = 485,1 \text{ V}$ a hodnotu energie akumulátoru $E = 1,56 \cdot 10^9 \text{ J}$. Díky energií akumulátoru lze vypočítat hodnotu kapacity, která je pro srovnání se štítkovou hodnotou uvedena v Tabulka 18.

12 Zobecnění výsledků disertační práce

Předmětem disertační práce byl vznik a vývoj modelu dané části Technologického centra v Ostravě – Vítkovicích. Prvotní idea vzniku byla v jeho použití, s kterým je možno sledovat změny parametrů v analyzované elektrické soustavě, jak je uvedeno v případě kapitoly deváté a desáté. Tímto modelem je možné predikovat situace, které mohou vzniknout v zapojení napájecí síť – nabíjení akumulátorů (nabíjení akumulátorů – napájecí síť), přes výkonový reverzibilní měnič. Další velká výhoda je optimalizace dodávky a odběru v rámci TCO, neboť vytvořeným modelem lze získat informace bez potřebného měření, které je nahrazeno příslušným modelem.

Vytvořený model může být využit pro pracovníky z Technologického centra v Ostravě, tak i pro technické pracovníky jiných center, kteří se zabývají stejným problémem, nebo kteří by chtěli zkoumat chování jednotlivým komponentů v zapojení napájecí síť – nabíjení akumulátorů (nabíjení akumulátorů – napájecí síť), přes výkonový reverzibilní měnič, nebo kteří se budou chtít zabývat danou situací a ověřit si naměřená data v praxi.

13 Závěr

Hlavní cíl disertační práce je vznik a vývoj nástroje, který je schopen simulovat situace, které se mohou vyskytnout před samotným měřením v TCO. Simulace je vytvořena na modelu výkonového měniče, který je vytvořená pomocí softwaru ATP.

Obsahově je možné zpracování disertační práce rozdělit na čtyři základní části. První kapitoly seznamují s výběrem softwaru nutného k naplnění funkční podstaty modelu a zabývá se technickým popisem Technologického centra, kde v popisu jsou zahrnuty jednotlivé zdroje elektrické energie, tak jak jsou v centru zapojeny. K tomu účelu je vytvořeno přehledné schéma s návazností na tyto zdroje. Kromě zdrojů jsou zahrnuty i spotřebiče, které ovlivňují spotřebu centra, tyto spotřebiče s jejich výkony jsou vloženy pro přehlednost do tabulky.

V druhé části, pod názvem „Model technologického centra Ostrava“, je provedena analýza jednotlivých zdrojů, které jsou zapojeny v TCO. Pozornost je věnována každému zdroji a každý zdroj je nahrazen prvkem a zapojením jednotlivých komponentů ze softwaru ATP Draw, aby bylo možno tento prvek použít pro další simulaci. K daným zdrojům jsou uvedeny i jejich parametry, které slouží jako hlavní zdroj informací pro simulaci.

Na závěr druhé části je provedena experimentální simulace, která se zabývá přenosem energie z akumulátorů, které jsou v TCO umístěny a slouží jako hlavní zdroj DC napětí na hladině 400 V, do napájecí sítě. Celé schéma je zapojeno v duchu DC zdroje (akumulátoru), výkonové elektroniky (řízený DC/DC měnič, řízený DC/AC střídač) a AC zdroje (napájecí síť). Simulace popisuje energetický přenos energie přes výkonový měnič, kde jsou určeny parametry jako např.: napětí, proud a výkony jednotlivých zdrojů, z těchto výkonů jsou pak stanoveny výkonové ztráty, které vznikaly daným přenosem energie. Experimentální simulace slouží jako ukázka použití daného softwaru a není podložena naměřenými hodnotami.

V třetí části, pod názvem „Analýza naměřených dat“, jsou provedeny dvě samotné analýzy naměřených údajů:

První krok simulace se prováděl při toku energie z distribuční sítě přes výkonový měnič až k nabíjení akumulátorů. Samotná simulace vycházela z aktuálního stavu měření, tudíž se muselo upravit zapojení pro daný měřený stav. Simulace má za úkol porovnat vytvořený model a naměřené data a zjistit správnost modelu dle implementovaných dat. Úkolem je stanovit

výstupní hodnoty napětí a proudu, které jsou potřebné pro nabíjení akumulátorů. Tyto elektrické parametry můžeme jednoduše nastavit na modelu danými prvky CONST a R_z . Pro regulaci výstupní hodnoty napětí je použita změna konstanty CONST, kterou najdeme ve schéma zapojení v řídicím obvodu DC/DC měniče. Nastavením hodnoty konstanty CONST se začne měnit i střída a tím dochází k regulaci výstupního napětí na požadovanou hodnotu. Regulace proudu je založena na výpočtu paralelního výstupního rezistoru R_z . Hodnota daného rezistoru je vypočtena dle Ohmova zákona a jeho hodnota nám určuje potřebný výstupní proud. Díky přesnému nastavení výstupních parametrů, lze dosáhnout přesných naměřených hodnot.

Druhý krok simulace se prováděl při opačném zapojení. Tedy při toku energie z hlavních akumulátorových bloků (1. sekce) přes výkonový měnič až do distribuční sítě. Zde má simulace za úkol porovnat vytvořený model a naměřené data a zjistit tak správnost modelu dle implementovaných dat a stanovit parametry na vstupní i výstupní straně (napětí, proudu a výkon) které jsou potřebné pro výpočet ztrát a k následnému porovnání s naměřenými hodnotami.

Porovnáním naměřených a simulovaných ztrát lze usoudit, že na modelu vznikají ztráty vyšší, to je způsobeno také i zapojením prvků a nesprávným odladěním modelu. Dále by bylo potřeba doplnit do střídače filtry, které by byly schopny odstranit matematické oscilace (spínací frekvence).

Na závěr obou simulací je proveden výpočet chyby měřicích přístrojů, kterými byly odečteny výstupní (vstupní) hodnotami z výkonového měniče. Ve výpočtu byly vypočteny chyby, jako jsou absolutní chyba a relativní chyba, jak pro digitální multimetr, tak i pro digitální klešťový ampérmetr, oba značky FLUKE.

V čtvrté části, pod názvem „Ověření nabíjecí charakteristiky olověného akumulátoru“, se zabývám ověřováním nabíjecích charakteristik právě zmiňovaného olověného akumulátoru, kde pomocí reálných dat nabíjecí charakteristiky se ověřuje zapojení pro následnou simulaci nabíjecích charakteristik. Simulace je provedena pomocí proudového zdroje, nelineárního odporu a kapacity.

Seznam použité literatury a podkladů

- [1] MOZDREN T., S. RUSEK, R. GONO, D. MINARIK and P. MOLDRIK: The Input Analysis of Parameters and Expected Operation Modes of Energetic Technologies in Technological Centre ENET. *Proceedings of the 2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. Kouty nad Desnou, Czech Republic, IEEE, 2015, p. 32-36, ISBN 978-146736788-2, WOS:000377548600007
- [2] MOZDREN T., S. RUSEK, R. GONO, and V. MACH: Use of the EMTP-ATP Software to Develop a Dynamic Model of the Technological Centre. *Advances in Electrical and Electronic Engineering (AEEE)*, Ostrava, Czech Republic, IEEE, 2016, Vol 4, No. 5, p. 467-474, ISSN: 13361376, DOI: 10.15598/aeee.v14i5.1719.
- [3] MOZDREN T., S. RUSEK, R. GONO and V. MACH: Analysis of Properties of Power Inverter Digital Model at the ENET Technological Centre. *Proceedings of the 2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. Kouty nad Desnou, Czech Republic, IEEE, 2017, p. 321-326, ISBN: 978-1-5090-6405-9, WOS:000422921000061
- [4] STOJKOVIC S., M. BJEKIC, AND Z. JARDA. Educational simulation model for studying the impact of distributed generation on distribution networks using ATP-EMTP software. *International Journal of Electrical Engineering Education (IJEED)*, Serbia, Manchester, 2014, Vol. 51, No 4, p.292-305, ISSN 00207209, DOI:10.7227/IJEEE.0002
- [5] ROJAS - CUBIDES H. E., A. S. CRUZ - BERNAL, AND H. D. ROJAS - CUBIDES. Analysis of voltage sag compensation in distribution systems using a multilevel DSTATCOM in ATP/EMTP. *Universidad Nacional de Colombia*, Medellín, Columbia, DYNA, 2015, Vol. 82, No 192, p.26-36, ISSN 00127353, DOI:10.15446/dyna.v82n192.48566
- [6] SALOMONSSON, D. *Modelling, Control and Protection of Low-Voltage DC Microgrids*. Sweden, 2008. Doctoral Thesis. Chalmers University of technology Sweden. Supervisor: Lenart Söder.
- [7] BRENNNA, M. *Modelling of distributed generators interfaced with Power electronics to medium voltage networks: Analysis of power quality, fault ride through and Protections coordination*. Milano, 2014. Doctoral Thesis. Ricera Sisterna Energetico Milano. Supervisor: Dario Lucarella.
- [8] HAN J., M. BJEKIC, AND Z. JARDA. Modeling and Analysis of a Low-Voltage DC Distribution System. *Open Access Resources*. South Korea, MDPI AG, 2015, Vol 4, No. 3, p.713-735, , ISSN 20799276, DOI:10.3390/resources4030713
- [9] BLUHM H. *Pulsed Power Systems-Principles and Applications*. Germany, 2006, ISBN 978-3-540-26137-7
- [10] WANG L.: *Modeling and Control of Sustainable Power Systems: Towards Smarter and Greener*

Electric Grids, *Green Energy and Technology*, Toledo, United States, Vol. 96, ISSN 18653529, ISBN 978-3-642-22903-9.

- [11] NEHRIR M. H., AND C. WANG. Modeling and control of fuel cells: distributed generation applications, *35th Annual Conference of the Industrial Electronics Society (IECON)*, Porto, Portugal, IEEE, 2009, ISBN 978-0-470-23328-3, DOI:10.1109/IECON.2009.5415415
- [12] ORJUELA O. F., ROJAS H. E., AND D. A. GUTIERREZ. Performance of True-48-Pulse DSTATCOM for Voltage Sag Mitigation, *Simposio Intenacional sobre Calidad de la Energia Electrica (SICEL)*, Varparasio, Chile, 2015, Vol. 8, ISSN: 2357-6618
- [13] MILANO F. *Power System Modelling and Scripting*, ETSII, University of Castilla, Spain, 2010, Vol. 54, p. 1-550, ISBN 978-3-642-13669-6, DOI:10.1007/978-3-642-13669-6
- [14] DEGNER T., A. ENGLER AND O. OSIKA: Modelling of Distributed Energy Resources with ATP-EMTP, *European ATP-EMTP Users Group Meeting and Conference*, Warsaw, Poland, 2005
- [15] MEDVED D., M. KOLCUN, Z. CONKA, P. HOCKO AND M. NOVAK: Simulation of faults in the power system and their elimination in the EMTP-ATP, *Proceedings of the 7th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering*, Stara Lesna, Slovak Republic, 2013, p. 484-487, ISBN 978-80-553-1441-9
- [16] MINARIK D., S. RUSEK, AND R. GONO. Implementation of accumulation technologies of electric energy to hybrid energy system - Project ENET. *Proceedings of the 13th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, Brno, Czech Republic, IEEE, 2012, Vol 2, p. 759-762, ISBN 978-80-214-4514-7, WOS: 000321966500141
- [17] SRIVASTAVA S. AND K. PANDEY. Improving Harmonic Distortion for Designing of HVDC Transmission System. *Progress In Science and Engineering Research Journal*, 2014. Vol. 02, No 03/06, p.117-121, ISSN 2347-6680
- [18] JOON H., YUN-SIK O., GI-HYEON G., DOO-UNG K., AND N. CHUL-HO. Modeling and Analysis of a Low-Voltage DC Distribution System. *MDPI AG*, 2015. Vol. 4, No. 3, p.713-735, ISSN 20799276, DOI:10.3390/resources4030713
- [19] KREJCI P., P. SANTARIUS, R. HAJOVSKY, R. VELICKA, AND R. CUMPELIK.: PQ monitoring in selected networks of Czech Republic. *Przeglad Elektrotechniczny*, Warsaw, Poland, 2012, Vol. 88, No. 7b, p. 183-185, ISSN: 0033-2097, WOS:000306011400047
- [20] UHER, M. *Optimalizace provozu sítí s obnovitelnými zdroji s využitím dynamického modelu*. Ostrava, 2014. Disertační práce, VŠB – TU Ostrava, Školitel: Stanislav Mišák.
- [21] VÝVODA, M. *Kvalita elektrické energie v distribuční sítích NN*. Brno, 2009. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce: Jaromír Bok

- [22] KUBALIK, P. New Concept of Hybrid Off-grid System in Technology Centre of Ostrava. *Proceedings of the 14th annual Ph.D Workshop (WOFEX)*, Ostrava, Czech Republic, 2016, p. 31-36, ISBN 978-80-248-3961-5
- [23] MOZDREN T.: The Input analysis of Parameters Energetic Technologies in Technology Centre ENET in Ostrava. *Proceedings of the 13th annual Ph.D Workshop (WOFEX)*, Ostrava, Czech Republic, 2015, p. 55-60, ISBN 978-80-248-3787-1
- [24] MOZDREN T., S. RUSEK, R. GONO and V MACH: Modeling of a Technological Centre in Ostrava using the Software EMTP-ATP. *Electrical Networks Workshop (ELNET)*, Ostrava, Czech Republic, 2015, p. 22-27, ISBN 978-80-248-3858-8
- [25] MOZDREN T.: Simulation of Transfer of Energy by Software EMTP-ATP on Power Converter. *Proceedings of the 14th annual Ph.D Workshop (WOFEX)*, Ostrava, Czech Republic, 2016, p. 43-48, ISBN 978-80-248-3961-5
- [26] MOZDREN T.: Analysis of Measured Values and Digital Model Created by Software EMTP-ATP. *Proceedings of the 15th annual Ph.D Workshop (WOFEX)*, Ostrava, Czech Republic, 2017, p. 49-54, ISBN 978-80-248-4056-7
- [27] MOZDREN T., S. RUSEK, R. GONO, D. MINARIK a P. MOLDRIK: Vstupní analýza parametrů a provozních režimů energetických technologií v technologickém centru ENET. *Časopis Energetika*, 6/65/2015, ČSZE Czech Republic, 2015, s. 329-333, ISSN 0375-8842.
- [28] V. MACH: “Wind Power Plant”, 2016, [cit. 2016-20-1]. Available at WWW: http://homen.vsb.cz/~mah30/laborator/PDF/4vetrnael_g2.pdf
- [29] J. WIATER: “Kurs praktycznego wykorzystania programu ATP - EMTP” 2016, [cit. 2016-20-10]. Available at WWW: <http://www.elektro.info.pl/artukul/id436,kurs-praktycznego-wykorzystania-programu-atp-emtp-czesc-1>.
- [30] BELL, S.: “A Beginner’s Guide to Uneversity of Measurement”, 2010, [cit. 2017-25-10]. Available at WWW: http://www.wmo.int/pages/prog/gcos/documents/gruanmanuals/UK_NPL/mgpg11.pdf
- [31] H. K. HØIDALEN: “Introduction to ATPDraw”, 2013 [cit. 2016-20-2]. Available at WWW: <http://atpdraw.net/docs/ATPDraw%20v5%20Presentation.pdf>
- [32] European EMTP – ATP User Group. *Full History*. [cit. 2017-30-3]. Available at WWW: <http://eeug-test.hostingkunde.de/index.php/about-eeug/full-history>
- [33] Alternative Transient Program. [cit. 2017-14-3]. Available at WWW: <http://www.emtp.org/>
- [34] Orinea. *Pyrolýza odpadů - moderní způsob jejich zneškodnění*. [cit. 2017-19-7]. Dostupný z WWW: <http://www.enviweb.cz/94618>
- [35] TUMOVA, O: “Nejistoty měření a EMC” 2009, [cit. 2017-20-10]. Dostupný z WWW:

http://www.csq.cz/fileadmin/user_upload/Spolkova_cinnost/Odborne_skupiny/Statisticke_metody/sborniky/2009/10_-_Nejistoty_mereni_a_EMC.pdf

- [36] LEROY – SOMER: Low Voltage Alternators - 4 pole, 2013, [cit. 2015-21-9]. Available at WWW: <http://acim.nidec.com/generators/leroy-somer/products/industrial>
- [37] ELCOM, a. s.: Manuál přístroje: BK-ELCOM – *Měření*, 2009, [cit. 2016-30-12]. Dostupný z WWW: <http://www.elcom.cz/cz/>
- [38] ELCOM, a. s.: Manuál přístroje: BK-ELCOM – *Analýza naměřených dat*, 2009, [cit. 2017-11-2]. Dostupný z WWW: <http://www.elcom.cz/cz/>

Soupis publikací a řešených projektů

Web of science a SCOPUS – příspěvky z konference

- NOVAK M., T. MOZDREN, M. GONO and M. GONO: Methods of Small Hydropower Plants Connection in Water Supply System. *14th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, Krakow, Poland, IEEE, 2014, p. 418-422, ISBN 978-147994661-7, WOS:000343491900080.
- MOZDREN T., S. RUSEK, R. GONO, D. MINARIK and P. MOLDRIK: The Input Analysis of Parameters and Expected Operation Modes of Energetic Technologies in Technological Centre ENET. *Proceedings of the 2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. Kouty nad Desnou, Czech Republic, IEEE, 2015, p. 32-36, ISBN 978-146736788-2, WOS:000377548600007
- MOZDREN T., S. RUSEK, R. GONO and V. MACH: Analysis of Properties of Power Inverter Digital Model at the ENET Technological Centre. *Proceedings of the 2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. Kouty nad Desnou, Czech Republic, IEEE, 2017, p. 321-326, ISBN: 978-1-5090-6405-9, WOS:000422921000061

Web of science a SCOPUS – příspěvky z časopisu

- MOZDREN T., S. RUSEK, R. GONO, and V. MACH: Use of the EMTP-ATP Software to Develop a Dynamic Model of the Technological Centre. *Advances in Electrical and Electronic Engineering (AEEE)*, Ostrava, Czech Republic, IEEE, 2016, Vol 4, No. 5, p. 467-474, ISSN: 13361376, DOI: 10.15598/aeee.v14i5.1719.

Odborné časopisy

- NOVAK M., T. MOZDREN, M. GONO a M. GONO: Methods of Small Hydroplants Connection in Water Suplly System. *Energetický partner*, Ostrava Czech Republic, 2014, Vol 6, No. 2, s. 19, ISSN 1805-7845

- MOZDREN T., S. RUSEK, R. GONO, D. MINARIK a P. MOLDRIK: Vstupní analýza parametrů a provozních režimů energetických technologií v technologickém centru ENET. *Energetika*. 6/65/2015, ČSZE Czech Republic, 2015, s. 329-333, ISSN 0375-8842.

Neindexované příspěvky

- HOUDEK V., T. MOZDREN, S. RUSEK and R. GONO: Analysis of the results of methodology for 110kV power lines restoration. *Electrical Networks Workshop (ELNET)*, Ostrava, Czech Republic, 2013, p. 7-12, ISBN 978-80-248-3254-8
- MOZDREN T.: Method of Small Hydropower Plants Connection in Water Supply System. *Proceedings of the 12th annual Ph.D Workshop (WOFEX)*, Ostrava, Czech Republic, 2014, p. 48-53, ISBN 978-80-248-3458-0
- MOZDREN T., S. RUSEK and R. GONO: The Connection of Non-Traditional Energy Sources in Lab, Ostrava-Vítkovice. *Electrical Networks Workshop (ELNET)*, Ostrava, Czech Republic, 2014, p. 59-66, ISBN 978-80-248-3663-8
- MOZDREN T.: The Input analysis of Parameters Energetic Technologies in Technology Centre ENET in Ostrava. *Proceedings of the 13th annual Ph.D Workshop (WOFEX)*, Ostrava, Czech Republic, 2015, p. 55-60, ISBN 978-80-248-3787-1
- MOZDREN T., S. RUSEK, R. GONO and V MACH: Modeling of a Technological Centre in Ostrava using the Software EMTP-ATP. *Electrical Networks Workshop (ELNET)*, Ostrava, Czech Republic, 2015, p. 22-27, ISBN 978-80-248-3858-8
- MOZDREN T.: Simulation of Transfer of Energy by Software EMTP-ATP on Power Converter. *Proceedings of the 14th annual Ph.D Workshop (WOFEX)*, Ostrava, Czech Republic, 2016, p. 43-48, ISBN 978-80-248-3961-5
- MOZDREN T.: Analysis of Measured Values and Digital Model Created by Software EMTP-ATP. *Proceedings of the 15th annual Ph.D Workshop (WOFEX)*, Ostrava, Czech Republic, 2017, p. 49-54, ISBN 978-80-248-4056-7

Spoluúčast na řešení studentských grantových soutěží

1. SGS SP 2013/137: Spolehlivost distribučních sítí s alternativními zdroji energie
2. SGS SP 2014/187: Analýza spolehlivosti sítí a optimalizace využití OZE
3. SGS SP 2015/192: Zajištění optimálního a spolehlivého provozu sítí s OZE
4. SGS SP 2016/95: Optimalizace elektrizační soustavy s on-grid OZE
5. SGS SP 2017/54: Optimalizace energetického systému s alternativními zdroji
6. SGS SP 2018/61: Provoz distribučních sítí s OZE

Přílohy A – matematický popis analýzy nabíjení akumulátorů z DS

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW  prosinec, pátek 1, 2017
C A Bonneville Power Administration program
C by H. K. Hřidalen at SEfAS/NTNU - NORWAY 1994-2009
C -----
C  dT  >< Tmax >< Xopt >< Copt ><Epsiln>
      1.E-7      .2
      500        1          0          0          0          0          0          1          0
/TACS
TACS HYBRID
C bylo 0,42
98XX0009  =      0.55
24TRI          1.      1.E-5
1.E3
98GATE 60+PLUS1  +PLUS1  +MINUS1          TRI
XX0009
98NGATE  = - GATE
33GATE
33TRI
C          1          2          3          4          5          6          7
8
C
34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567
890
/BRANCH
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R  >< L  >< C  >
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R  >< A  >< B  ><Leng><><>0
C 0.6
DC      XX0001          20.
0
XX0002XX0008          .001
0
XX0004XX0008          .001
0
XX0005AC_A          .001
0
XX0003XX0008          .001
0
XX0006AC_B          .001
0
XX0007AC_C          .001
0
XX0008B          6.7E-6          750.
2
B      A          1.E-5          500.
0
A      B          21.2
3
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie  ><Vf/CLOP >< type  >
13XX0001A          GATE
0
13XX0001B          CLOSED          NGATE
0
11AC_A  XX0003          CLOSED
0

```

```

11AC_B  XX0002          CLOSED
0
11AC_C  XX0004          CLOSED
0
11B     XX0005          CLOSED
0
11B     XX0006          CLOSED
0
11B     XX0007          CLOSED
0
      XX0008DC          MEASURING
1
      ACA   AC_A          MEASURING
1
      ACB   AC_B          MEASURING
1
      ACC   AC_C          MEASURING
1
/SOURCE
C < n 1><>< Ampl.  >< Freq.  ><Phase/T0><  A1  ><  T1  >< TSTART ><
TSTOP  >
14ACA          151.7      50.          -1.
100.
14ACB          151.7      50.      -120.      -1.
100.
14ACC          151.7      50.      120.          -1.
100.
/OUTPUT
      AC_A  AC_B  AC_C
BLANK TACS
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```

Přílohy B – matematický popis analýzy dodávky elektrické energie do DS

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW  únor, středa 28, 2018
C A Bonneville Power Administration program
C by H. K. Hřídalen at SEfAS/NTNU - NORWAY 1994-2009
C -----
C  dT  >< Tmax >< Xopt >< Copt ><Epsiln>
      2.E-7      .2
      500        1          0          0          0          0          1          0
/TACS
TACS HYBRID
C bylo 0,42
98XX0009  =      0.59
24TRI      1.      2.5E-6
1.E3
98GATE 60+PLUS1  +PLUS1  +MINUS1      TRI
XX0009
14XX0002      1.      50.      120.
1.E3
98XX0010  = XX0016 - XX0017
98XX0003  = XX0002 .GT. XX0010
98XX0011  = .NOT. XX0003
14XX0004      1.      50.
1.E3
98XX0012  = XX0016 - XX0017
11XX0017      1.
1.E3
98XX0005  = XX0004 .GT. XX0012
98XX0013  = .NOT. XX0005
14XX0006      1.      50.      -120.
1.E3
98XX0014  = XX0016 - XX0017
98XX0007  = XX0006 .GT. XX0014
98XX0015  = .NOT. XX0007
24XX0016      2.      .001
1.E3
98NGATE  = - GATE
33GATE
33TRI
33XX0003
33XX0002
33XX0005
33XX0004
33XX0016
33XX0007
33XX0006
C      1          2          3          4          5          6          7
8
C
34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567
890
/BRANCH
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
OUT- DC      500.
0
IN      XX0001      .7
1

```

```

      IN      XX0001      3.5E4
      OUT+    OUT-      1.E3
2
      OUT+      1.E8
0
      OUT-      1.E8
0
      OUT+      1.E8
0
      OUT-      1.E8
0
      OUT+      1.E8
0
      OUT-      1.E8
0
      U_1A    X0008A      .01      .1
1
      U_1B    X0008B      .01      .1
1
      U_1C    X0008C      .01      .1
1
      OUT-      1.E6
0
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
13XX0001DC
0
      DC      OUT+      MEASURING
1
13XX0001OUT-      CLOSED      NGATE
0
13OUT+    U_1A
XX0003    0
13OUT-    U_1A
XX0011    0
13OUT+    U_1B
XX0005    0
13OUT-    U_1B
XX0013    0
13OUT+    U_1C
XX0007    0
13OUT-    U_1C
XX0015    0
/SOURCE
C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART ><
TSTOP >
11IN      400.      -1.
1.E3
18OUT-      1.0
14X0008A    342.805368      50.      120.      -1.
100.
14X0008B    342.805368      50.      -1.
100.
14X0008C    342.805368      50.      -120.      -1.
100.
/OUTPUT
      U_1A    U_1B    U_1C    X0008AX0008BX0008C
BLANK TACS
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE

```


BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

Přílohy C – matematický popis nabíjecí charakteristiky akumulátorů

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW  prosinec, pátek 1, 2017
C A Bonneville Power Administration program
C by H. K. Hřidalen at SEfAS/NTNU - NORWAY 1994-2009
C -----
C  dT  >< Tmax >< Xopt >< Copt ><Epsiln>
      .5    1.2E5
      500    1      0      0      1      0      0      1      0
C      1      2      3      4      5      6      7
8
C
34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567
890
/BRANCH
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R  >< L  >< C  >
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R  >< A  >< B  ><Leng><><>0
91XX0001                                3333.
4
      10.
      13.57
      13.83
      14.17
      14.57
      15.
      16.07
      16.17
      16.17
      0.0
      21600.
      43200.
      64800.
      86400.
      1.08E5
      118800.
      1.18E5
9999
XX0001                                1.E5
2
/SOURCE
C < n 1><><> Ampl.  >< Freq.  ><Phase/T0><  A1  ><  T1  >< TSTART ><
TSTOP  >
11XX0001-1      30.
1.3E5
/OUTPUT
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```